

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-234545

(43)Date of publication of application : 22.08.2003

(51)Int.Cl.

H01S 5/343

H01L 21/205

H01S 5/223

(21)Application number : 2002-030771

(71)Applicant : SANYO ELECTRIC CO LTD

(22)Date of filing : 07.02.2002

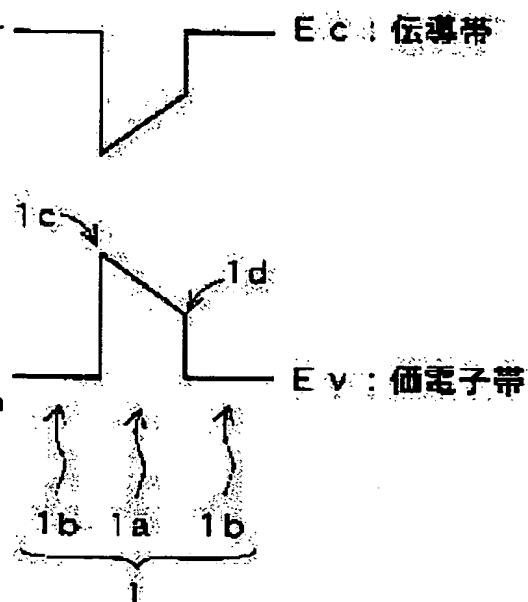
(72)Inventor : KANO TAKASHI  
HATA MASAYUKI

## (54) SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING ELEMENT

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a semiconductor light emitting element in which a lowering in recombination probability of electron and hole due to piezoelectric effect can be suppressed without causing such a problem as a lowering in response or an increase in threshold current density.

**SOLUTION:** The semiconductor light emitting element comprises an SQW emission layer (active layer) 1 having a quantum well structure including a well layer 1a and a barrier layer 1b wherein the band gap energy of the well layer 1a is varied asymmetrically to the center of the well layer 1a in the thickness direction so that inclination of band due to a piezoelectric field is suppressed.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

02.08.2004

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-234545

(P2003-234545A)

(43) 公開日 平成15年8月22日 (2003.8.22)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テームト<sup>\*</sup>(参考)

H 0 1 S 5/343

6 1 0

H 0 1 S 5/343

6 1 0

5 F 0 4 5

H 0 1 L 21/205

H 0 1 L 21/205

5 F 0 7 3

H 0 1 S 5/223

H 0 1 S 5/223

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 32 頁)

(21) 出願番号 特願2002-30771(P2002-30771)

(22) 出願日 平成14年2月7日 (2002.2.7)

(71) 出願人 000001889

三洋電機株式会社  
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号

(72) 発明者 狩野 隆司  
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三  
洋電機株式会社内

(72) 発明者 畑 雅幸  
大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三  
洋電機株式会社内

(74) 代理人 100104433

弁理士 宮園 博一

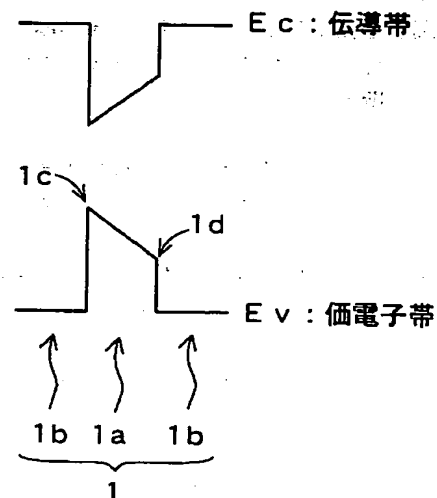
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体発光素子

(57) 【要約】

【課題】 応答速度の低下や閾値電流密度の増加などの問題点を発生させることなく、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することが可能な半導体発光素子を提供する。

【解決手段】 この半導体発光素子は、井戸層1aと障壁層1bとを含む量子井戸構造を有するSQW発光層(活性層)1を備え、井戸層1aのバンドギャップエネルギーは、ピエゾ電界によるバンドの傾きを抑制するように、井戸層1aの厚み方向の中心に対して非対称に変化されている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 井戸層と障壁層とを含む量子井戸構造を有する発光層を備え、

前記井戸層は厚み方向に対してピエゾ電界を有し、

前記井戸層および前記障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーは、前記井戸層および前記障壁層の少なくとも一方の厚み方向の中心に対して非対称に変化されている、半導体発光素子。

【請求項2】 前記井戸層および前記障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーは、前記井戸層および前記障壁層の少なくとも一方の組成を変化させることによって、前記井戸層および前記障壁層の少なくとも一方の厚み方向に変化されている、請求項1に記載の半導体発光素子。

【請求項3】 前記井戸層および前記障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーは、一定の変化率で変化されている、請求項1または2に記載の半導体発光素子。

【請求項4】 前記井戸層および前記障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーは、段差状に変化されている、請求項1または2に記載の半導体発光素子。

【請求項5】 井戸層と障壁層とを含む量子井戸構造を有する発光層を備え、

前記井戸層は厚み方向に対してピエゾ電界を有し、

前記井戸層のバンドギャップエネルギーは、前記井戸層の厚み方向に変化されているとともに、前記井戸層と前記障壁層との境界部でバンドギャップが急峻に変化している、半導体発光素子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、半導体発光素子に関し、特に、量子井戸構造を有する発光層を備える半導体発光素子に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 近年、窒化物系半導体発光素子の開発が盛んに行われている。通常、この発光素子の発光層（活性層）には、MQW（Multiple Quantum Well：多重量子井戸）構造などの量子井戸構造が用いられる。この量子井戸構造では、電流印加により井戸層中に導入されたキャリアが障壁層によって井戸層中に閉じ込められるので、電子-正孔の再結合確率を増加させることができる。これにより、発光効率を向上させることができる。

【0003】 図69は、従来の量子井戸構造からなる活性層を備える窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）を示した断面図である。図70は、図69に示した従来の窒化物系半導体レーザ素子のSQW（Single Quantum Well：単一量子井戸）活性層を示す断面図である。また、図71は、図69に示した従来の窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層

のエネルギーバンドを示したバンド図である。図72は、図69に示した従来の窒化物系半導体レーザ素子における、SQW活性層のピエゾ電界によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【0004】 まず、図69を参照して、従来の窒化物系半導体レーザ素子の構造について説明する。この従来の窒化物系半導体レーザ素子では、図69に示すように、サファイア基板101上に、GaN低温バッファ層102を介してGaN層103が形成されている。GaN層103上には、所定の間隔を隔てて、SiO<sub>2</sub>膜からなるマスク層104が形成されている。このマスク層104およびGaN層103上に、ELOG（Epitaxial Lateral Overgrowth：選択横方向成長）法により成長されたELOG低欠陥GaN層105が形成されている。

【0005】 ELOG低欠陥GaN層105上には、n型GaNコンタクト層106、約0.1μmの厚みを有するIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nからなるn側光吸収モード安定化層107、約1.0μmの厚みを有するn型AlGaInクラッド層108、約0.1μmの厚みを有するn型GaN光ガイド層109、InGaInからなるSQW活性層110、p型AlGaInキャップ層111、約0.1μmの厚みを有するp型GaN光ガイド層112、および、約0.3μmの厚みを有するとともに、凸部を含むp型AlGaInクラッド層113がこの順序で形成されている。このp型AlGaInクラッド層113の凸部上には、約0.07μmの厚みを有するp型GaNコンタクト層114が形成されている。p型AlGaInクラッド層113の凸部と、p型GaNコンタクト層114とによって、ストライプ状のリッジ部が形成されている。

【0006】 また、p型GaNコンタクト層114の上面以外の領域を覆うとともに、p型AlGaInクラッド層113の上面の全面を覆うように、In<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nからなるp側光吸収モード安定化層115が約0.2μmの厚みで形成されている。p型GaNコンタクト層114上には、p側電極116が形成されている。このp側電極116の上面以外、および、n型GaNコンタクト層106の露出された上面の一部以外の全面を覆うように、SiO<sub>2</sub>からなる絶縁膜117が形成されている。

【0007】 そして、p側電極116の上面の全面を覆うように、p側パッド電極118が形成されている。また、n型GaNコンタクト層106の開口部により露出された上面に接触するように、n側電極119が形成されている。

【0008】 次に、図70～図72を参照して、従来の窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層110について説明する。この従来の窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層110は、図70に示すように、InGaIn

からなる井戸層110aと、井戸層110aの上および下に形成されたInGa<sub>x</sub>Nからなる障壁層110bとから構成されている。この場合、一般的には、SQW活性層110の価電子帯および伝導帯のエネルギーバンドは、図71に示すように、平坦なバンド構造となる。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記した従来の窒化物系半導体発光レーザ素子のSQW活性層110では、井戸層110aと障壁層110bとの界面の歪みに起因して発生するピエゾ電界（ピエゾ効果）によって、図72に示すように、井戸層110aのエネルギーバンドに傾きが生じる。このため、井戸層110aの電子と正孔とが、井戸層110aの中心に対して互いに反対側に偏るので、井戸層110aにおける電子の分布状態を示す波動関数と正孔の分布状態を示す波動関数との重なりが小さくなる。その結果、電子-正孔の再結合確率が低下するので、発光効率が低下するという問題点があった。

【0010】そこで、従来、上記したピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の発光効率の低下を抑制するため、以下の2つの方法が提案されている。

【0011】まず、第1の方法として、均一なバンドギャップからなる活性層にドナー不純物をドーピングすることによって、導電性を向上させる方法が提案されている。これにより、井戸層における電子の数を増加させることによって、電子-正孔の再結合確率を増加することができるので、ピエゾ効果による正孔の再結合確率の低下を抑制することができる。しかしながら、この第1の方法では、活性層中のキャリアが、ドーピングされた不純物によって散乱されやすいという不都合がある。このため、キャリアの移動度が低下しやすくなるので、窒化物系半導体レーザ素子の応答速度が低下しやすいという問題点があった。さらに、過度なドーピングは、結晶欠陥の原因となり、これにより非発光センターが生じるため、バンド間での電子-正孔再結合確率が低下するという問題点もある。

【0012】また、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制するための第2の方法として、井戸層の膜厚を薄くする方法も提案されている。このように、井戸層の膜厚を薄くすることにより、井戸層の幅が小さくなるので、井戸層の両側に分極したキャリアの偏りを緩和することができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができる。しかしながら、この第2の方法では、井戸層を薄く形成することにより、キャリアのオーバーフローが生じやすいという不都合が生じる。このため、閾値電流密度が逆に増加するという問題点があった。また、1原子オーダーでの急峻な界面を有する薄い井戸層からなる量子井戸構造を歩留まりよく形成するのは困難であるため、井戸層の膜厚を薄く形成することは限界があるとい

う問題点もあった。

【0013】この発明は、上記のような課題を解決するためになされたものであり、この発明の1つの目的は、応答速度の低下や閾値電流密度の増加などの問題点を発生させることなく、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することが可能な半導体発光素子を提供することである。

【0014】この発明のもう1つの目的は、上記の半導体発光素子において、電子の分布状態を示す波動関数と正孔の分布状態を示す波動関数との重なりを大きくすることである。

【0015】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、この発明の第1の局面による半導体発光素子は、井戸層と障壁層とを含む量子井戸構造を有する発光層を備え、井戸層は厚み方向に対してピエゾ電界を有し、井戸層および障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーは、ピエゾ電界によるバンドの傾きを抑制するように、井戸層および障壁層の少なくとも一方の厚み方向の中心に対して非対称に変化されている。

【0016】この第1の局面による半導体発光素子では、上記のように、井戸層および障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーを変化することによって、ピエゾ電界によるバンドの傾きを抑制するように変化することによって、ピエゾ効果による電子または正孔の偏りを低減することができるので、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができる。これにより、発光効率を向上させることができる。また、ドーピングを行わずにピエゾ効果による電子または正孔の偏りを低減することができるので、ドーピングを行う場合に比べて、キャリアの移動度を向上させることができるとともに、欠陥を低減することができる。これにより、発光素子の応答特性を向上させることができる。また、欠陥に起因する非発光センタを減少させることができる。この非発光センタの減少によっても、発光効率を向上させることができる。また、井戸層の厚みを薄くすることなくピエゾ効果による電子または正孔の偏りを低減することができるので、井戸層の厚みを薄くし過ぎた場合に生じるキャリアのオーバーフローによる閾値電流密度の増加などの不都合も生じない。さらに、井戸層および障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーを、井戸層および障壁層の少なくとも一方の厚み方向の中心に対して非対称に変化させることによって、非対称の形状を調節すれば、ピエゾ電界が加わった状態で、井戸層または障壁層の厚み方向の中心に対して同じ側に、電子および正孔を偏りやすくすることができる。また、井戸層または障壁層の厚み方向の中心に対して反対側に、電子および正孔が分離している場合でも、その分離の距離を小さくすることができる。したがって、電子の分布状態を示す波動関数と正孔の分布状態を示す波動

関数との重なりを大きくすることができる。これにより、電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0017】上記第1の局面による半導体発光素子において、好ましくは、井戸層および障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーは、井戸層および障壁層の少なくとも一方の構成元素の組成を変化させることによって、井戸層および障壁層の少なくとも一方の厚み方向に変化されている。このように構成すれば、容易に、発光層のバンドギャップエネルギーを発光層の厚み方向に変化させることができる。

【0018】上記の半導体発光素子において、井戸層および障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーは、一定の変化率で変化されていてもよい。また、井戸層および障壁層の少なくとも一方のバンドギャップエネルギーは、段差状に変化されていてもよい。

【0019】この発明の第2の局面による半導体発光素子は、井戸層と障壁層とを含む量子井戸構造を有する発光層を備え、井戸層は厚み方向に対してピエゾ電界を有し、井戸層のバンドギャップエネルギーは、ピエゾ電界によるバンドの傾きを抑制するように、井戸層の厚み方向に変化されているとともに、井戸層と障壁層との境界部でバンドギャップが急峻に変化している。

【0020】この第2の局面による半導体発光素子では、上記のように、井戸層のバンドギャップエネルギーを変化することによって、ピエゾ電界によるバンドの傾きを抑制するように変化することによって、ピエゾ効果による電子または正孔の偏りを低減することができるので、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができる。これにより、発光効率を向上させることができる。また、ドーピングを行わずにピエゾ効果による電子または正孔の偏りを低減することができるので、ドーピングを行う場合に比べて、キャリアの移動度を向上させることができるとともに、欠陥を低減することができる。これにより、発光素子の応答特性を向上させることができるとともに、欠陥に起因する非発光センタを減少させることができる。この非発光センタの減少によっても、発光効率を向上させることができる。また、井戸層の厚みを薄くすることなくピエゾ効果による電子または正孔の偏りを低減することができるので、井戸層の厚みを薄くし過ぎた場合に生じるキャリアのオーバーフローによる閾値電流密度の増加などの不都合も生じない。さらに、井戸層と障壁層との境界部でバンドギャップを急峻に変化させることによって、井戸層のバンドギャップを厚み方向に変化させた場合にも、井戸層が浅くなるのを防止することができる。これにより、キャリアが井戸層に閉じこもりにくくなるのを防止することができるので、キャリアのオーバーフローを抑制することができる。

【0021】なお、上記半導体発光素子において、ピエ

ゾ電界によるバンドの傾きより、バンドギャップエネルギーの変化の方が小さくてもよい。この場合、バンドギャップエネルギーの変化が小さくてもよいので、構成元素の組成の変化が少なくてもよい。このように構成すれば、ピエゾ電界による価電子帯のバンドの傾きおよび伝導帯のバンドの傾きのどちらか一方を抑制することができるので、ピエゾ効果による電子または正孔の偏りを低減することができる。これにより、電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0022】また、上記半導体発光素子において、ピエゾ電界によるバンドの傾きより、バンドギャップエネルギーの変化の方が大きくなっていることがより好ましい。このように構成すれば、価電子帯の頂上のエネルギー変化の向きと、伝導帯の底のエネルギー変化の向きが反対になる。この結果、井戸層の厚み方向の中心に対して同じ側に、電子および正孔を偏らせることができるので、電子の分布状態を示す波動関数と正孔の分布状態を示す波動関数との重なりを大きくすることができる。これにより、電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0023】また、上記半導体発光素子において、ピエゾ電界により印加されるポテンシャルエネルギーの変化の向きと、発光層のバンドギャップエネルギーの変化による価電子帯の頂上のエネルギー変化の向きとが、互いに逆方向であってもよい。このように構成すれば、伝導帯の底のエネルギー変化を大きくすることができるので、電子の偏りを大きくすることができる。この場合、価電子帯の頂上のエネルギー変化の向きと、伝導帯の底のエネルギー変化の向きとが反対になっていれば、電子の分布状態を示す波動関数と正孔の分布状態を示す波動関数との重なりをさらに大きくすることができる。これにより、電子-正孔の再結合確率の低下をさらに抑制することができるので、発光効率をさらに向上させることができる。

【0024】また、上記半導体発光素子において、ピエゾ電界により印加されるポテンシャルエネルギーの変化の向きと、発光層のバンドギャップエネルギーの変化による伝導帯の底のエネルギー変化の向きとが、互いに逆方向であってもよい。3族元素の組成の変化によるバンドギャップエネルギーの変化によって、価電子帯の頂上のエネルギー変化より、伝導帯の底のエネルギー変化の量の方が大きい。したがって、3族元素の組成の変化が少なくても、価電子帯の頂上のエネルギー変化の向きと、伝導帯の底のエネルギー変化の向きを反対にすることができる。また、価電子帯の頂上のエネルギー変化の向きと、伝導帯の底のエネルギー変化の向きが同じであっても、電子の有効質量は正孔に比べて小さいために、バンドギャップの変化が小さくても、伝導帯の電子の偏りを低減する効果が大きい。

【0025】また、上記半導体発光素子において、バン

ドギャップエネルギーの変化は、井戸層に形成することが好ましい。このように構成すれば、ピエゾ効果による電子または正孔の偏りを低減する効果大きい。

【0026】また、上記半導体発光素子において、量子井戸層が窒化物系半導体からなっているもよい。窒化物系半導体では、ピエゾ効果が特に大きいとともに、通常ピエゾ効果のもっとも大きくなる(0001)面を主面とする量子井戸構造がもっとも作製しやすい。このため、量子井戸構造中のピエゾ電界が大きい。したがって、量子井戸層が窒化物系半導体からなる場合に、本発明の効果が大きい。

【0027】また、上記半導体発光素子において、量子井戸層が $In_xGa_{1-x}N$  ( $x > 0$ ) からなってもよい。 $In_xGa_{1-x}N$  ( $x > 0$ ) は格子整合する基板がほとんど存在しないため、量子井戸構造中のピエゾ電界が大きい。したがって、量子井戸層が $In_xGa_{1-x}N$  ( $x > 0$ ) からなる場合に、本発明の効果が大きい。

【0028】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面に基いて説明する。

【0029】(第1実施形態) 図1は、本発明の第1実施形態による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)のSQW活性層を示した断面図である。図2は、図1に示した第1実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW(単一量子井戸)活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図3～図5は、図1に示した第1実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。なお、図1に示したSQW活性層の深さ方向(図中、上から下へと向かう方向)は、図2～図5の図面における左から右へと向かう方向に対応している。また、第1実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層以外の構造は、図69に示した従来の窒化物系半導体レーザ素子の構造と同様である。

【0030】まず、図1～図5を参照して、第1実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層1の構造について説明する。第1実施形態の窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層1は、図1に示すように、井戸層1aと、井戸層1aの上下に配置された障壁層1bとによって形成されている。井戸層1aは、 $In_xGa_{1-x}N$  から形成されている。障壁層1bは、 $In_yGa_{1-y}N$  から形成されている。ここで、井戸層1aと障壁層1bの $In$ 組成は( $0 < x \leq 1$ ,  $0 \leq y < 1$ ,  $y < x$ )として構成される。

【0031】ここで、第1実施形態では、 $In_xGa_{1-x}N$  からなる井戸層1aの $In$ 組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを抑制するように、一定の変化率で連続的に変化することによって、井戸層1aのバンドギャップを連続的に変化させている。具体的には、第1

実施形態のバンドギャップは、図2に示すように、井戸層1aの左端1cから右端1dに向かって、一定の変化率で傾斜状に増加するとともに、井戸層1aの厚み方向の中心に対して非対称な構造となっている。また、井戸層1aの左端1cおよび右端1dのバンドギャップと、井戸層1aに隣接して形成された障壁層1bのバンドギャップとが不連続に形成されている。一例として、障壁層1bを $GaN$ で構成し、井戸層1aの左端1cにおける $In$ 組成 $x$ を15%とし、右端1dにおける $In$ 組成 $x$ を11%とすれば、このような量子井戸構造を構成することができる。

【0032】図2に示した構造を有するSQW活性層1のエネルギーバンドに、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合には、図3～図5のいずれかに示すようなバンド図になる。図3は、井戸層1aにおいて、ピエゾ電界によるバンドの傾きより、バンドギャップエネルギー変化の方が小さい例である。図3を参照して、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きと、井戸層1aの $In$ 組成を変化することにより形成された価電子帯のバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層1aの価電子帯のバンド構造は、ピエゾ効果による傾きが抑制された構造となる。図4は、井戸層1aのバンドギャップエネルギー変化を大きくした例を示しており、価電子帯のバンド構造は、平坦に近いバンド構造となる。図5は、 $In$ 組成変化を大きくして井戸層1aの左端1cのバンドギャップをより小さくすることにより、ピエゾ電界によるバンドの傾きより、バンドギャップエネルギー変化の方を大きくした例を示している。この場合、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きと反対方向の価電子帯のバンドの傾きを有するバンド構造となる。なお、実際は、 $In$ 組成の変化により、ピエゾ電界およびピエゾ電界によるバンドの傾きも変化するが、発明の概念を簡単に説明するために、上記のバンド構造図では、 $In$ 組成の違いによるピエゾ電界およびピエゾ電界によるバンドの傾きの違いは省略した。

【0033】第1実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層1aのバンドギャップを変化することによって、ピエゾ電界による価電子帯のバンドの傾きを抑制することができるので、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減することができる。また、価電子帯のバンドの傾きを、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きと反対方向にすることができるので、井戸層1aにおける厚み方向の電子および正孔の偏りを同じ側にするすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができる。これにより、発光効率を向上させることができる。また、ドーピングを行わずにピエゾ効果による正孔の偏りを低減することができるので、ドーピングを行う場合に比べて、キャリアの移動度を向上させることができるとともに、欠陥を低減することができる。これに

より、窒化物系半導体レーザ素子の応答特性を向上させることができるとともに、欠陥に起因する非発光センタを減少させることができる。この非発光センタの減少によっても、発光効率を向上させることができる。また、井戸層1aの厚みを薄くすることなくピエゾ効果による正孔の偏りを低減することができるので、井戸層1aの厚みを薄くし過ぎた場合に生じるキャリアのオーバーフローによる閾値電流密度の増加などの不都合も生じない。

【0034】また、第1実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、図2に示したように、井戸層1aのバンド構造を、井戸層1aの厚み方向の中心に対して非対称に変化させることによって、ピエゾ電界が加わった場合に、図4に示すように、価電子帯の正孔を井戸層1aに均一に分布させることができる。これにより、図7.2に示した従来の構造に比べて、価電子帯の正孔と伝導帯の電子との距離が小さくなるとともに、価電子帯の正孔の分布を示す波動関数と、伝導帯の電子の分布を示す波動関数との重なりを大きくすることができる。その結果、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0035】また、第1実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、井戸層1aの左端1cおよび右端1dのバンドギャップと、井戸層1aに隣接して形成された障壁層1bのバンドギャップとが不連続に形成されているので、井戸層1aのバンドギャップと障壁層1bのバンドギャップとを連続して変化するように形成する場合に比べて、形成が容易になる。すなわち、井戸層1aおよび障壁層1bの結晶成長時にTMI（トリメチルインジウム）をチャンバーと排気部とに供給する2本のパイプに接続されるバルブを切り替えることのみによって、容易に、チャンバー内へのTMIの供給を遮断することができるので、図2に示した不連続なバンドギャップを有する第1実施形態のSQW活性層1を容易に形成することができる。

【0036】なお、正孔の有効質量は電子に比べて大きいので、正孔は電子よりもピエゾ効果による偏りが生じやすい。このため、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減する第1実施形態のSQW活性層1の構造は、電子-正孔の再結合確率の低下を抑制するのに効果的であると考えられる。

【0037】図6は、本発明の第1実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図7～図9は、図6に示した第1実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第1実施形態の変形例では、井戸層のバンドギャップの変化の方向を第1実施形態と逆

向きにすることによって、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減した場合の例について説明する。第1実施形態の変形例のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0038】この第1実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層2は、図6に示すように、 $In_xGa_{1-x}N$ からなる井戸層2aと、井戸層2aの上下に配置された $In_yGa_{1-y}N$ からなる障壁層2bとによって形成されたSQW活性層2を有する。

【0039】この第1実施形態の変形例では、 $In_xGa_{1-x}N$ からなる井戸層2aのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを抑制するように、一定の変化率で傾斜状に変化させることによって、井戸層2aのバンドギャップを連続的に変化させている。具体的には、第1実施形態の変形例のバンドギャップは、図6に示すように、井戸層2aの左端2cから右端2dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少するとともに、井戸層2aの厚み方向の中心に対して非対称な構造となっている。一例として、障壁層2bをGaNで構成し、井戸層2aの左端2cにおけるIn組成Xを7%とし、右端2dにおけるIn組成Xを20%とすれば、このような量子井戸構造を構成することができる。図6に示したSQW活性層2のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図7～図9のいずれかに示すようなバンド図になる。

【0040】図7は、井戸層2aにおいて、ピエゾ電界によるバンドの傾きより、バンドギャップエネルギー変化の方が小さい例を示している。図7を参照して、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きと、井戸層2aのIn組成を変化することにより形成された伝導帯のバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層2aの伝導帯のバンド構造は、ピエゾ効果による傾きが抑制された構造となる。図8は、井戸層2aのバンドギャップエネルギー変化を大きくした例を示しており、伝導帯のバンド構造は、平坦に近いバンド構造となる。図9は、In組成変化を大きくして井戸層2aの右端2dのバンドギャップをより小さくすることにより、ピエゾ電界によるバンドの傾きより、バンドギャップエネルギー変化の方を大きくした例を示しており、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きと反対方向の伝導帯のバンドの傾きを有するバンド構造となる。

【0041】第1実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層2aのバンドギャップを、ピエゾ電界による伝導帯のエネルギーバンドの傾きを抑制するように変化することによって、ピエゾ電界による伝導帯のバンドの傾きを抑制することができる。これにより、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減することができるので、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができる。これにより、発光効率を向上させることができる。

【0042】また、第1実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、図6に示したように、井戸層2aのバンド構造を、井戸層2aの中心に対して非対称に変化させることによって、ピエゾ電界が加わった場合に、図8に示すように、伝導帯の電子を井戸層2aに均一に分布させることができる。これにより、図72に示した従来の構造に比べて、価電子帯の正孔と伝導帯の電子との距離が小さくなるとともに、価電子帯の正孔の分布を示す波動関数と、伝導帯の電子の分布を示す波動関数との重なりを大きくすることができる。その結果、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができる。

【0043】なお、電子の有効質量は正孔に比べて小さいため、電子は正孔よりもピエゾ電界により偏りやすい。このため、伝導帯の電子の偏りを低減するのに必要なバンドギャップの変化も小さくてよいので、In組成の変化をそれほど大きくする必要がない。その結果、伝導帯の電子に対するピエゾ効果を低減するようなバンドギャップの変化を与える第1実施形態の変形例の構造は、比較的容易に形成することが可能である。

【0044】なお、第1実施形態の変形例のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0045】(第2実施形態)図10は、本発明の第2実施形態による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図11は、図10に示した第2実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第2実施形態では、井戸層のバンドギャップを中央付近で段差状に変化させることにより、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減した場合の例について説明する。第2実施形態のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0046】この第2実施形態の窒化物系半導体レーザ素子は、図10に示すように、 $In_xGa_{1-x}N$ からなる井戸層3aと、井戸層3aの上下に配置された $In_yGa_{1-y}N$ からなる障壁層3bとによって形成されたSQW活性層3を有する。

【0047】この第2実施形態では、 $In_xGa_{1-x}N$ からなる井戸層3aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを抑制するように、井戸層3aの中央付近で段差状に変化させている。具体的には、第3実施形態のバンドギャップは、図10に示すように、井戸層3aの左端3cから中心部3dに向かって、平坦なバンド構造となっている。そして、井戸層3aの中心部3dで、バンドギャップが段差状に増加するとともに、井戸層3aの中心部3d部から右端3eに向かって、再び、平坦な構造となっている。このため、井戸層3aのバンドギャップは、井戸層3aの中心に対して非対称な構造となっている。図10に示したSQW活性層3のエネル

ギバンドに、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合には、図11に示すようなバンド図になる。図11を参照して、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きと、井戸層3aのIn組成を変化することにより形成された価電子帯のバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層3aの価電子帯のバンド構造は、価電子帯のエネルギーの最も高い領域が、井戸層3aの中央付近に位置するバンド構造となる。これにより、井戸層3aの価電子帯の正孔は、井戸層3aの中心部3d付近に集中する。

【0048】第2実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔が、井戸層3aの中心部3d付近に集中するとともに、伝導帯の電子もより低いエネルギーを有する井戸層3aの左端3c付近に集中するので、井戸層3aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ効果が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0049】なお、第2実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0050】図12は、本発明の第2実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図13は、図12に示した第2実施形態の変形例によるSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第2実施形態の変形例では、井戸層のバンドギャップの変化の方向を第2実施形態と逆方向にすることによって、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減した場合の例について説明する。第2実施形態の変形例のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0051】この第2実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子は、図12に示すように、 $In_xGa_{1-x}N$ からなる井戸層4aと、井戸層4aの上下に配置された $In_yGa_{1-y}N$ からなる障壁層4bとによって形成されたSQW活性層4を有する。

【0052】この第2実施形態の変形例では、 $In_xGa_{1-x}N$ からなる井戸層4aのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを抑制するように、井戸層4aの中央付近で段差状に変化させている。具体的には、第4実施形態のバンドギャップは、図12に示すように、井戸層4aの左端4cから中心部4dに向かって、平坦なバンド構造となっている。そして、井戸層4aの中心部4dで、バンドギャップが段差状に減少するとともに、井戸層4aの中心部4dから右端4eに向かって、再び、平坦な構造となっている。このため、井戸層4aのバンドギャップは、井戸層4aの中心に対して非



対称な構造となっている。図 12 に示した S Q W 活性層 4 のエネルギーバンドに、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合には、図 13 に示すようなバンド図になる。図 13 を参照して、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きと、井戸層 4 a の  $I_n$  組成を変化することにより形成された伝導帯のバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層 4 a のバンド構造は、伝導帯のエネルギーの最も低い領域が、井戸層 4 a の中央付近に位置するバンド構造となっている。これにより、井戸層 4 a の伝導帯の電子は、井戸層 4 a の中心部 4 d 付近に集中する。

【0053】第 2 実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、伝導帯の電子が、井戸層 4 a の中心部 4 d 付近に集中するとともに、価電子帯の正孔もより高いエネルギーを有する井戸層 4 a の右端 4 e 付近に集中するので、井戸層 4 a における実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0054】なお、第 2 実施形態の変形例のその他の効果は、第 1 実施形態の変形例と同様である。

【0055】(第 3 実施形態) 図 14 は、本発明の第 3 実施形態による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)の S Q W 活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図 15 は、図 14 に示した第 3 実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の S Q W 活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第 3 実施形態では、井戸層のバンドギャップを一定の変化率で変化させるとともに、中央付近で段差状に変化させることによって、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減した場合の例について説明する。第 3 実施形態のその他の構成は、第 1 実施形態と同様である。

【0056】この第 3 実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の活性層 5 は、図 14 に示すように、 $I_{nX}Ga_{1-X}N$  からなる井戸層 5 a と、井戸層 5 a の上下に配置された  $I_{nY}Ga_{1-Y}N$  からなる障壁層 5 b とによって形成された S Q W 活性層 5 を有する。

【0057】この第 3 実施形態では、 $I_{nX}Ga_{1-X}N$  からなる井戸層 5 a の  $I_n$  組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを抑制するように、一定の変化率で傾斜状に変化するとともに、井戸層 5 a の中央付近で段差状に変化している。具体的には、第 3 実施形態のバンドギャップは、図 14 に示すように、井戸層 5 a の左端 5 c から中心部 5 d に向かって、一定の変化率で傾斜状に増加する。そして、井戸層 5 a の中心部 5 d で、バンドギャップは段差状に増加するとともに、井戸層 5 a の中心部 5 d から右端 5 e に向かって、再び、一定の変化率

でバンドギャップが増加する構造となっている。このため、井戸層 5 a のバンドギャップは、井戸層 5 a の中心に対して非対称な構造となっている。一例として、障壁層 5 b を  $GaN$  で構成し、井戸層 5 a の  $I_n$  組成  $X$  が左端 5 c における 15% から中心部 5 d における 12.5% に減少し、中心部で段差状に減少し、さらに中心部 5 d における 11% から右端 5 e における 8.5% に減少するようにすれば、このような量子井戸構造を構成することができる。

【0058】図 14 に示した S Q W 活性層 3 のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図 15 に示すようなバンド図になる。図 15 を参照して、ピエゾ電界による価電子帯のバンドの傾きと、井戸層 5 a の  $I_n$  組成を変化することにより形成されたバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層 5 a の価電子帯のバンド構造は、井戸層 5 a の左端 5 c から中心部 5 d に向かって、傾きが抑制された平坦に近いバンド構造となる。そして、井戸層 5 a の中心部 5 d で、段差状にエネルギーバンドが減少するとともに、井戸層 5 a の中心部 5 d から右端 5 e に向かって、再び、傾きが抑制された平坦に近いバンド構造となる。これにより、井戸層 5 a の価電子帯の正孔は、より高いエネルギーを有する井戸層 5 a の左側半分(左端 5 c から中心部 5 d の範囲)の領域に集中する。

【0059】第 3 実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔が、井戸層 5 a の左側半分に集中するとともに、伝導帯の電子もより低いエネルギーを有する井戸層 5 a の左端 5 c 付近に集中するので、井戸層 5 a における実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0060】なお、第 3 実施形態のその他の効果は、第 1 実施形態と同様である。

【0061】図 16 は、本発明の第 3 実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)の S Q W 活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図 17 は、図 16 に示した第 3 実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子の S Q W 活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第 3 実施形態の変形例では、第 3 実施形態の井戸層のバンドギャップ変化の方向を逆向きにすることによって、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減した場合の例について説明する。第 3 実施形態のその他の構成は、第 1 実施形態と同様である。

【0062】この第 3 実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子は、図 16 に示すように、 $I_{nX}Ga$

1- $\chi$ Nからなる井戸層6aと、井戸層6aの上下に配置されたIn $\chi$ Ga1- $\chi$ Nからなる障壁層6bとによって形成されたSQW活性層6を有する。

【0063】この第3実施形態の変形例では、In $\chi$ Ga1- $\chi$ Nからなる井戸層6aのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを抑制するように、一定の変化率で変化するとともに、井戸層6aの中央付近で段差状に変化させている。具体的には、第3実施形態の変形例のバンドギャップは、図16に示すように、井戸層6aの左端6cから中心部6dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、井戸層6aの中心部6dで、バンドギャップは段差状に減少するとともに、井戸層6aの中心部6dから右端6eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状にバンドギャップが減少する構造となっている。このため、井戸層6aのバンドギャップは、井戸層6aの中心に対して非対称な構造となっている。図16に示したSQW活性層6のエネルギーバンドに、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合には、図17に示すようなバンド図になる。図17を参照して、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きと、井戸層6aのIn組成を変化することにより形成された伝導帯のバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層6aの伝導帯のバンド構造は、井戸層6aの左端6cから中心部6dに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。そして、井戸層6aの中心部6dで、段差状にエネルギーバンドが減少するとともに、井戸層6aの中心部6dから右端6eに向かって、再び、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。これにより、井戸層6aの伝導帯の電子は、より低いエネルギーを有する井戸層6aの右側半分（中心部6dから右端6eの範囲）の領域に集中する。

【0064】第3実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、伝導帯の電子が、井戸層6aの右側半分に集中するとともに、価電子帯の正孔もより高いエネルギーを有する井戸層6aの右端6e付近に集中させるので、井戸層6aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0065】なお、第3実施形態の変形例のその他の効果は、第1実施形態の変形例と同様である。

【0066】（第4実施形態）図18は、本発明の第4実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図19は、図18に示した第4実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合

のバンド図である。この第4実施形態では、井戸層のバンドギャップを一定の変化率で変化させるとともに、中央付近で段差状に変化させることによって、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減した場合の例について説明する。第4実施形態のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0067】この第4実施形態の窒化物系半導体レーザ素子は、図18に示すように、In $\chi$ Ga1- $\chi$ Nからなる井戸層7aと、井戸層7aの上下に配置されたIn $\chi$ Ga1- $\chi$ Nからなる障壁層7bとによって形成されたSQW活性層7を有する。

【0068】この第4実施形態では、In $\chi$ Ga1- $\chi$ Nからなる井戸層7aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減するように、一定の変化率で傾斜状に変化するとともに、井戸層7aの中央付近で段差状に変化している。具体的には、第4実施形態のバンドギャップは、図18に示すように、井戸層7aの左端7cから中心部7dに向かって、一定の変化率で傾斜状に増加する。そして、井戸層7aの中心部7dで、バンドギャップは段差状に減少するとともに、井戸層7aの中心部7dから右端7eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。このため、井戸層7aのバンドギャップは、井戸層7aの中心に対して非対称な構造となっている。図18に示したSQW活性層7のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図19に示すようなバンド図になる。図19を参照して、ピエゾ電界による価電子帯のバンドの傾きと、井戸層7aのIn組成を変化することにより形成されたバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層7aの価電子帯のバンド構造は、井戸層7aの左端7cから中心部7dに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。そして、井戸層7aの中心部7dで段差状にエネルギーバンドが増加するとともに、井戸層7aの中心部7dから右端7eに向かって、再び、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。これにより、価電子帯の正孔は、より高いエネルギーを有する井戸層7aの右側半分（中心部7dから右端7eの範囲）の傾きが抑制された領域に集中する。

【0069】第4実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔が、井戸層7aの右側半分に集中するとともに、伝導帯の電子も、より高いエネルギーを有する井戸層7aの中央付近に集中するので、井戸層7aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。また、井戸層7aの伝導帯のエネルギーは、中央付近でもっとも低くなってい

る。これにより、伝導帯の電子は、井戸層7aの中央付近に集中する。

【0070】なお、第4実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0071】図20は、本発明の第4実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図21は、図20に示した第4実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。なお、この第4実施形態の変形例では、井戸層のバンドギャップの変化の方向を第4実施形態と逆方向にすることによって、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減した場合の例について説明する。第4実施形態の変形例のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0072】この第4実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子は、図20に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層8aと、井戸層8aの上下に配置された $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層8bとによって形成されたSQW活性層8を有する。

【0073】この第4実施形態の変形例では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層8aのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減するように、一定の変化率で傾斜状に変化させるとともに、井戸層8aの中央付近で段差状に変化させている。具体的には、第4実施形態の変形例のバンドギャップは、図20に示すように、井戸層8aの左端8cから中心部8dに向かって、一定の変化率でバンドギャップを傾斜状に減少する。そして、井戸層8aの中心部8dで、バンドギャップは段差状に増加するとともに、井戸層8aの中心部8dから右端8eに向かって、再び、一定の変化率で減少する構造となっている。このため、井戸層8aのバンドギャップは、井戸層8aの中心に対して非対称なバンド構造となっている。図20に示したSQW活性層8のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きを考慮した場合、図21に示すようなバンド図になる。図21を参照して、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きと、In組成を変化することにより形成されたバンドの傾きとが合わることによって、井戸層8aの伝導帯のバンド構造は、井戸層8aの左端8cから中心部8dに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。そして、井戸層8aの中心部8dで段差状にエネルギーバンドが増加するとともに、井戸層8aの中心部8dから右端8eに向かって、再び、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。これにより、伝導帯の電子は、より低いエネルギーを有する井戸層8aの左側半分（左端8cから中心部8dの範囲）の傾きが抑制された領域に集中する。また、井戸層8aの価電子帯のエネルギーは、中央付近でもっとも高くなっている。これにより、価電子帯の

正孔は、井戸層8aの中央付近に集中する。

【0074】第4実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、伝導帯の電子が、井戸層8aの左側半分に集中するとともに、価電子帯の正孔もより高いエネルギーを有する井戸層8aの中央付近に集中するので、井戸層8aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0075】なお、第4実施形態の変形例の他の効果は、第1実施形態の変形例と同様である。

【0076】（第5実施形態）図22は、本発明の第5実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図23は、図22に示した第5実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。なお、この第5実施形態では、井戸層のバンドギャップを一定の変化率で変化させるとともに、中央付近で段差状に変化させることによって、価電子帯の正孔の偏りを低減した場合の例について説明する。第5実施形態のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0077】この第5実施形態による窒化物系半導体レーザ素子は、図22に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層9aと、井戸層9aの上下に配置された $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層9bとによって形成されたSQW活性層9を有する。

【0078】この第5実施形態では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層9aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを抑制するように、一定の変化率で傾斜状に変化するとともに、井戸層9aの中央付近で段差状に変化している。具体的には、第5実施形態のバンドギャップは、図22に示すように、井戸層9aの左端9cから中心部9dに向かって、一定の変化率でバンドギャップが傾斜状に減少する。そして、中心部9dで、バンドギャップは段差状に減少するとともに、中心部9dから右端9eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。このため、井戸層9aのバンドギャップは、井戸層9aの中心に対して非対称な構造となっている。図22に示したSQW活性層9のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図23に示すようなバンド図になる。図23を参照して、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きと、井戸層9aのIn組成を変化することにより形成されたバンドの傾きとが合わることによって、井戸層9aの価電子帯のバンド構造は、井戸層9

aの左端9cから中心部9dに向かって、急激に増加するバンド構造となる。そして、中心部9dで、段差状にエネルギーバンドが増加するとともに、井戸層9aの中心部9dから右端9eに向かって、再び、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。これにより、価電子帯の正孔は、より高いエネルギーを有する井戸層9aの右側半分（中心部9dから右端9eの範囲）の傾きが抑制された領域に集中する。また、井戸層9aの伝導帯のエネルギーは、中央付近でもっとも低くなる。これにより、伝導帯の電子は、井戸層9aの中央付近に集中する。

【0079】第5実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔が、井戸層9aの右側半分に集中するとともに、伝導帯の電子もより低いエネルギーを有する井戸層9aの中央付近に集中するので、井戸層9aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0080】なお、第5実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0081】図24は、本発明の第5実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図25は、第5実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のエネルギーバンド図である。この第5実施形態の変形例では、井戸層のバンドギャップの変化の方向を第9実施形態と逆方向にすることによって、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減した場合の例について説明する。第5実施形態の変形例のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0082】この第5実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層10は、図24に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層10aと、井戸層10aの上下に配置された $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層10bとによって形成されたSQW活性層10を有する。

【0083】この第5実施形態の変形例では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層10aの $\text{In}$ 組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを抑制するように、一定の変化率で傾斜状に変化するとともに、井戸層10aの中央付近で段差状に変化している。具体的には、第5実施形態の変形例のバンドギャップは、図24に示すように、井戸層10aの左端10cから中心部10dに向かって、一定の変化率でバンドギャップを傾斜状に減少する。そして、中心部10dで、バンドギャップは、段差

状に増加するとともに、井戸層10aの中心部10dから右端10eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。このため、井戸層10aのバンドギャップは、井戸層10aの中心に対して非対称なバンド構造となっている。

【0084】図24に示したSQW活性層10のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図25に示すようなバンド図になる。図25を参照して、ピエゾ効果によるバンドの傾きと、井戸層10aの $\text{In}$ 組成を変化することにより形成されたバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層10aの伝導帯のバンド構造は、井戸層10aの左端10cから中心部10dに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。そして、井戸層10aの中心部10dで、段差状にエネルギーバンドが増加するとともに、井戸層10aの中心部10dから右端10eに向かって、エネルギーバンドが急激に増加するバンド構造となっている。これにより、伝導帯の電子は、より低いエネルギーを有する井戸層10aの左側半分（左端10cから中心部10dの範囲）の傾きが抑制された領域に集中する。また、井戸層10aの価電子帯のエネルギーは、中央付近でもっとも高くなっている。これにより、価電子帯の正孔は、井戸層10aの中央付近に集中する。

【0085】第5実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、伝導帯の電子が、井戸層10aの左側半分に集中するとともに、価電子帯の正孔もより高いエネルギーを有する井戸層10aの中央付近に集中するので、井戸層5aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0086】なお、第5実施形態の変形例のその他の効果は、第1実施形態の変形例と同様である。

【0087】（第6実施形態）図26は、本発明の第6実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示すバンド図である。また、図27は、図26に示した第6実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。なお、この第6実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層の構造は、井戸層11aの左端11cのバンドギャップが障壁層11bのバンドギャップと一致していること以外は、第5実施形態のSQW活性層の構造と同様である。

【0088】この第6実施形態の窒化物系半導体レーザ素子のは、図26に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層11aと、井戸層11aの上下に配置されたI

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる障壁層11bとによって形成されたS Q W活性層11を有する。

【0089】この第6実施形態では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層11aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを抑制するように、一定の変化率で傾斜状に変化するとともに、井戸層11aの中央付近で段差状に変化している。具体的には、第6実施形態のバンドギャップは、図26に示すように、障壁層11bのバンドギャップと同一のバンドギャップを有する井戸層11aの左端11cから中心部11dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、井戸層11aの中心部11dで、バンドギャップは、段差状に減少するとともに、中心部11dから右端11eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。このため、井戸層11aのバンドギャップは、井戸層11aの中心に対して非対称なバンド構造となっている。図26に示したS Q W活性層11のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図27に示すようなバンド図になる。図27を参照して、ピエゾ電界による価電子帯のバンドの傾きと、井戸層11aのIn組成を変化することにより形成されたバンドとが合わさることによって、井戸層11aの価電子帯のバンド構造は、井戸層11aの左端11cから中心部11dに向かって、急激に増加する構造となる。そして井戸層11aの中心部11dで、エネルギーバンドが段差状に増加するとともに、井戸層11aの中心部11dから右端11eに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。これにより、価電子帯の正孔は、より高いエネルギーを有する井戸層11aの右側半分（中心部11dから右端11eの範囲）の傾きが抑制された領域に集中する。また、井戸層11aの伝導帯のエネルギーは、中央付近でもっとも低くなっている。これにより、伝導帯の電子は、井戸層11aの中央付近に集中する。

【0090】第6実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、第5実施形態と同様、価電子帯の正孔が、井戸層11aの右側半分に集中するとともに、伝導帯の電子もより低いエネルギーを有する井戸層11aの中央付近に集中するので、井戸層11aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0091】なお、第6実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0092】図28は、本発明の第6実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ

素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図29は、図28に示した第6実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。なお、この第6実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層の構造は、井戸層12aの右端のバンドギャップが障壁層12bのバンドギャップと一致していること以外は、第5実施形態の変形例のS Q W構造と同様である。

【0093】この第6実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層12は、図28に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層12aと、井戸層12aの上下に配置された $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層12bとによって形成されたS Q W活性層12を有する。

【0094】ここで、第6実施形態の変形例では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層12aのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを抑制するように、一定の変化率で傾斜状に変化するとともに、井戸層12aの中央付近で段差状に変化させている。具体的には、第6実施形態の変形例のバンドギャップは、図28に示すように、井戸層12aの左端12cから中心部12dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、井戸層12aの中心部12dで、バンドギャップは、段差状に増加するとともに、再び、バンドギャップは、一定の変化率で傾斜状に増加することによって、障壁層12bのバンドギャップと一致する構造となっている。このため、井戸層12aのバンドギャップは、井戸層12aの中心に対して非対称なバンド構造となっている。

【0095】図28に示したS Q W活性層12aのエネルギーバンドに、ピエゾ効果による電界のバンドの傾きを考慮した場合には、図29に示すようなバンド図になる。図29を参照して、ピエゾ電界による伝導帯のバンドの傾きと、In組成を変化することにより形成されたバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層12aの伝導帯のバンド構造は、井戸層12aの左端12cから中心部12dに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。そして中心部12dで、エネルギーバンドは、段差状に増加するとともに、井戸層12aの中心部12dから右端12eに向かって、急激に増加する構造となる。これにより、伝導帯の電子は、より低いエネルギーを有する井戸層12aの左側半分（左端12cから中心部12dの範囲）の傾きが抑制された領域に集中する。また、井戸層12aの価電子帯のエネルギーは、中央付近でもっとも高くなっている。これにより、価電子帯の正孔は、井戸層12aの中央付近に集中する。

【0096】第6実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、第5実施形態の変形例と同様、伝導帯の電子が、井戸層12aの左側半分に集中するとともに、価電子帯の正孔もより高いエネルギー

を有する井戸層5aの中央付近に集中するので、井戸層5aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0097】なお、第6実施形態の変形例のその他の効果は、第1実施形態の変形例と同様である。

【0098】(第7実施形態)図30は、本発明の第7実施形態による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図31は、図30に示した第7実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。なお、この第7実施形態では、井戸層の中央付近でバンドギャップは最も小さくなるとともに、中央以外の領域のバンドギャップを一定の変化率で変化させることによって、ピエゾ電界による伝導帯の正孔の偏りを低減した場合の例について説明する。第7実施形態のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0099】この第7実施形態の窒化物系半導体レーザ素子は、図30に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層13aと、井戸層13aの上下に配置された $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層13bとによって形成されたSQW活性層13を有する。

【0100】この第7実施形態では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層13aの $\text{In}$ 組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを抑制するように、井戸層13aの中心部でバンドギャップが最小となるとともに、その左右の領域のバンドギャップを、一定の変化率により傾斜状に変化している。具体的には、第7実施形態のバンドギャップは、図30に示すように、井戸層13aの左端13cから中心部13dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、井戸層13aの中心部13dで、バンドギャップが最小となるとともに、中心部13dから右端13eに向かって、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。なお、井戸層13aの左端13cから中心部13dの範囲におけるバンドギャップの変化率は、中心部13dから右端13eの範囲のバンドギャップの変化率の絶対値よりも小さい。これにより、井戸層13aのエネルギーバンドは、三角形を有する左右非対称構造となっている。一例として、障壁層13bをGa<sub>2</sub>Nで構成し、井戸層13aの左端13cにおける $\text{In}$ 組成Xを11%とし、中心部13dにおける $\text{In}$ 組成Xを15%とし、右端13eにおける $\text{In}$ 組成Xを8%とすれば、このような量子井戸構造を構成することができる。

【0101】図30に示したSQW活性層13のエネル

ギバンドに、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図31に示すようなバンド図になる。図31を参照して、ピエゾ電界による価電子帯のバンドの傾きと、井戸層13aの $\text{In}$ 組成を変化することにより形成された価電子帯のバンドの傾きとが合わせることによって、井戸層13aのバンド構造は、井戸層13aの左端13cから中心部13dに向かって、一定の変化率で増加するバンド構造となる。そして、井戸層13aの中心部13dで、エネルギーバンドが最大となるとともに、中心部13dから右端13eに向かって、井戸層13aの中心部13dの左端13cから中心部13dの領域の変化率とほぼ同一の変化率で減少するバンド構造となる。これにより、価電子帯の正孔は、もっとも高いエネルギーを有する井戸層13aの中心部13dに集中する。また、井戸層13aの伝導帯のエネルギーは、中心部13d付近でもっとも低くなっている。これにより、伝導帯の電子は、中央付近に集中する。

【0102】第7実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔を井戸層13aの中心部13d付近に集中させるとともに、伝導帯の電子も中心部13d付近に集中させることによって、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができるので、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。

【0103】また、第7実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層13aの価電子帯の構造を、井戸層13aの中心に対して非対称な三角形とすることによって、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合に、井戸層13aの価電子帯のバンドの傾きを左右均一にすることができる。これによっても、電子-正孔の再結合確率をさらに向上させることができる。

【0104】なお、第7実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0105】図32は、本発明の第7実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図33は、図32に示した第7実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第7実施形態の変形例では、井戸層のバンドギャップの変化の方向を第7実施形態と逆方向にすることによって、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減した場合の例について説明する。第7実施形態の変形例のその他の構成は、第1実施形態と同様である。

【0106】この第7実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層28では、図32に示

すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層14aと、井戸層14aの上下に配置された $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層14bとによって形成されたSQW活性層14を有する。

【0107】この第7実施形態の変形例では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層14aのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを抑制するように、井戸層14aの中心部でバンドギャップが最小となるとともに、その左右の領域のバンドギャップを、一定の変化率により傾斜状に変化している。具体的には、第7実施形態の変形例のバンドギャップは、図32に示すように、井戸層14aの左端14cから中心部14dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、井戸層14aの中心部14dで、バンドギャップが最小となるとともに、中心部14dから右端14eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。なお、井戸層14aの左端14cから中心部14dの範囲におけるバンドギャップの変化率は、中心部14dから右端14eの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値よりも大きい。これにより、井戸層14aのエネルギーバンドは、三角形形状を有する左右非対称な構造となっている。

【0108】図32に示したSQW活性層14のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図33に示すようなバンド図になる。図33を参照して、ピエゾ電界によるバンドの傾きと、井戸層14aのIn組成を変化することにより形成された伝導帯のバンドの傾きとが合わさることによって、井戸層14aの伝導帯のバンド構造は、井戸層14aの左端14cから中心部14dの範囲に向かって、一定の変化率で減少するバンド構造となる。そして、井戸層14aの中心部14dでエネルギーバンドが最小となるとともに、中心部14dから右端14eに向かって、井戸層14aの左端14cから左端14dの変化率と同一の変化率で増加するバンド構造となる。これにより、伝導帯の電子は、もっとも低いエネルギーを有する井戸層14aの中心部14dに集中する。また、井戸層14aの価電子帯のエネルギーは、中央付近でもっとも高くなっている。これにより、価電子帯の正孔は、中央付近に集中する。

【0109】第7実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、伝導帯の電子を井戸層14aの中心部14d付近に集中させるとともに、価電子帯の正孔を中心部14d付近に集中させることによって、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができるので、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。

【0110】また、第7実施形態の変形例による窒化物

系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層14aの伝導帯の構造を、井戸層14aの中心に対して非対称な三角形形状とすることによって、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合に、井戸層14aの伝導帯のバンドの傾きを左右均一にすることができる。これによっても、電子-正孔の再結合確率をさらに向上させることができる。

【0111】なお、第7実施形態の変形例のその他の効果は、第1実施形態の変形例と同様である。

【0112】(第8実施形態) 図34は、本発明の第8実施形態による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)のMQW(多重量子井戸)活性層を示した断面図である。図35は、図34に示した第8実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図36は、図34に示した第8実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第8実施形態では、MQW活性層において、ピエゾ効果による井戸層の価電子帯の正孔の偏りを低減するだけでなく、ピエゾ効果による障壁層の価電子帯の傾きをも低減した場合の例について説明する。なお、図34に示した活性層の深さ方向(図中、上から下へと向かう方向)は、図35および図36の図面における左から右へと向かう方向に対応している。

【0113】図34~図36を参照して、第8実施形態による窒化物系半導体レーザ素子は、図34に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層15aと、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層15bとを交互に積層することによって形成されたMQW活性層15を有する。

【0114】この第8実施形態では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層15aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減するように変化するとともに、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層15bのIn組成を、ピエゾ効果による障壁層の価電子帯の傾きを抑制するように変化している。

【0115】なお、井戸層15aのバンド構造は、図30に示した第7実施形態の井戸層13aのエネルギーバンドと同様のバンド構造を有する。すなわち、井戸層15aのバンドギャップは、図35に示すように、井戸層15aの左端15cから中心部15dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少している。そして、井戸層15aの中心部15dで、バンドギャップが極小となるとともに、中心部15dから右端15eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。なお、井戸層15aの左端15cから中心部15dの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値は、中心部15dから右端15eの範囲におけるバンドギャップの増加率の絶対値よりも小さい。これにより、井戸層15aのエネルギーバンドは、三角形形状を有する左右非対称な構



造となっている。また、障壁層15bのバンドギャップは、左端15fから右端15gの範囲に向かって、一定の変化率で傾斜状に増加されている。

【0116】図35に示したMQW活性層15のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図36に示すようなバンド図になる。図36を参照して、井戸層15aの価電子帯のエネルギーバンドは、第7実施形態と同様、井戸層15aの中心部15dで極大となるとともに、伝導帯のエネルギーバンドは、井戸層15aの中心部15dで極小となる。これにより、伝導帯の正孔および価電子帯の電子が、井戸層15aの中心部15d付近に集中する。また、障壁層15bの価電子帯のバンド構造は、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。

【0117】第8実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔を井戸層15aの中心部15d付近に集中させるとともに、伝導帯の電子も中心部15d付近に集中させることによって、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができるので、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。

【0118】また、第8実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層15aの価電子帯の構造を、井戸層15aの中心に対して非対称な三角形状とすることによって、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合に、井戸層15aの価電子帯におけるバンドの傾きを左右均一にすることができる。これにより、電子-正孔の再結合確率をさらに向上させることができる。

【0119】また、第8実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、障壁層15bの価電子帯がピエゾ効果によって傾くことを抑制することによって、井戸層15aの実質的な深さが浅くなるのを防止することができるので、電子を井戸層15aに閉じ込めやすくすることができる。これにより、発光効率をさらに向上させることができる。

【0120】なお、第8実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0121】図37は、本発明の第8実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図38は、図37に示した第8実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるエネルギーバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。なお、第8実施形態の変形例では、第8実施形態の井戸層のバンドギャップの変化の方向を逆方向にすることによって、井戸層の伝導帯の電子の偏りを低減するだけでなく、ピエゾ効果に

よる障壁層の伝導帯の傾きをも抑制した場合の例について説明する。

【0122】この第8実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子は、図37に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層16aと、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層16bとが交互に積層することによって形成されたMQW活性層16を有する。

【0123】この第8実施形態の変形例では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層16aの $\text{In}$ 組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減するように変化するとともに、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層16bの $\text{In}$ 組成を、ピエゾ効果による障壁層16bの伝導帯の傾きを抑制するように変化している。

【0124】なお、井戸層16aのバンド構造は、図32に示した第7実施形態の変形例の井戸層14aのバンド構造と同様のバンド構造を有する。すなわち、井戸層16aのバンドギャップは、図37に示すように、井戸層16aの左端16cから中心部16dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、井戸層16aの中心部16dで、バンドギャップが極小となるとともに、中心部16dから右端16eに向かって、再び、バンドギャップが一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。なお、井戸層16aの左端16cから中心部16dの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値は、中心部16dから右端16eの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値よりも大きい。これにより、井戸層16aのエネルギーバンドは、三角形状を有する左右非対称な構造となっている。また、障壁層16bのバンドギャップは、左端16fから右端16gに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少している。

【0125】図37に示したMQW活性層16のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図38に示すようなバンド図になる。図38を参照して、井戸層16aの伝導帯のエネルギーバンドは、第7実施形態の変形例と同様、井戸層16aの中心部16dで極小となるとともに、価電子帯のエネルギーバンドは、井戸層16aの中心部16dで極大となる。これにより、伝導帯の正孔および価電子帯の電子が、井戸層16aの中心部16d付近に集中する。また、障壁層16bの伝導帯のバンド構造は、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。

【0126】第8実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、伝導帯の電子を井戸層16aの中心部16d付近に集中させるとともに、価電子帯の正孔を中心部16d付近に集中させることによって、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができるので、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。



【0127】また、第8実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層16aの伝導帯の構造を、井戸層16aの中心に対して非対称な三角形状とすることによって、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合に、井戸層16aの価電子帯におけるバンドの傾きを左右均一にすることができる。これにより、電子-正孔の再結合確率をさらに向上させることができる。

【0128】また、第8実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、障壁層16bの伝導帯がピエゾ効果によって傾くことを抑制することによって、井戸層16aの実質的な深さが浅くなるのを防止することができるので、電子を井戸層16aに閉じ込めやすくすることができる。これにより、発光効率をさらに向上させることができる。

【0129】なお、第8実施形態の変形例のその他の効果は、第1実施形態の変形例と同様である。

【0130】(第9実施形態)図39は、本発明の第9実施形態による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)のMQW活性層を示した断面図である。また、図40は、図39に示した第9実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第9実施形態では、MQW活性層において、ピエゾ効果による井戸層の価電子帯の正孔の偏りを低減するだけでなく、ピエゾ効果による障壁層の価電子帯の傾きをも抑制した場合の例について説明する。

【0131】この第9実施形態の窒化物系半導体レーザ素子は、図39に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層17aと、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層17bとを交互に積層することによって形成されたMQW活性層17を有する。

【0132】この第9実施形態では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層17aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減するように変化させるとともに、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層17bのIn組成を、ピエゾ効果による障壁層17bの価電子帯の傾きを抑制するように変化している。

【0133】なお、井戸層17aのバンド構造は、図30に示した第7実施形態の井戸層13aのエネルギーバンド構造と同様のバンド構造を有する。すなわち、井戸層17aのバンドギャップは、図39に示すように、井戸層17aの左端17cから中心部17dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、井戸層17aの中心部17dで、バンドギャップが極小となるとともに、中心部17dから右端17eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。なお、井戸層17aの左端17cから中心部17dの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値は、中心部17dから右端17eの範囲におけるバンドギャップの変

化率の絶対値よりも小さい。これにより、井戸層17aのエネルギーバンドは、三角形状を有する左右非対称な構造となっている。また、障壁層17bのバンドギャップは、左端17fから中心部17gに向かって、一定の変化率で増加するとともに、中心部17gから右端17hに向かって、傾きが抑制された平坦な構造となっている。

【0134】図39に示した構造を有するMQW活性層17のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による価電子帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図40に示すようなバンド図になる。図40を参照して、井戸層17aの価電子帯のエネルギーバンドは、第7実施形態と同様、井戸層17aの中心部17dで極大となるとともに、伝導帯のエネルギーバンドは、井戸層17aの中心部17dで極小となる。これにより、伝導帯の正孔および価電子帯の電子が、井戸層17aの中心部17d付近に集中する。また、障壁層17bの価電子帯のエネルギーバンドは、障壁層17bの左側半分(左端17fから中心部17gの範囲)で傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。

【0135】第9実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔を井戸層17aの中心部17d付近に集中させるとともに、伝導帯の電子も中心部17d付近に集中させることによって、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができるので、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。

【0136】また、第9実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層17aの価電子帯の構造を、井戸層17aの中心に対して非対称な三角形状とすることによって、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合、井戸層17aの価電子帯におけるバンドの傾きを左右均一にすることができる。これにより、さらに、電子-正孔再結合確率を向上させることができる。

【0137】また、第9実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、障壁層17bの価電子帯の左側半分がピエゾ効果によって傾くことを抑制することによって、井戸層17の実質的な深さが浅くなるのを防止することができるので、電子を井戸層17aに閉じ込めやすくすることができる。これにより、発光効率をさらに向上させることができる。

【0138】なお、第9実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0139】図41は、本発明の第9実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子(窒化物系半導体レーザ素子)のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図42は、図41に示した第9実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層に

おける、ピエゾ効果によるエネルギーバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第9実施形態の変形例では、第9実施形態の井戸層のバンドギャップの変化の向きを逆方向にすることによって、ピエゾ効果による井戸層の伝導帯の電子の偏りを低減するだけでなく、ピエゾ効果による障壁層の伝導帯の傾きをも抑制した場合の例について説明する。

【0140】この第9実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子は、図41に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層18aと、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層18bとを交互に積層することによって形成されたMQW活性層17を有する。

【0141】この第9実施形態の変形例では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層18aのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減するとともに、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層18bのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の傾きを抑制するように変化している。

【0142】なお、井戸層18aのエネルギーバンド構造は、図32に示した第7実施形態の変形例の井戸層14aのバンド構造と同様のバンド構造を有する。すなわち、井戸層18aのバンドギャップは、図41に示すように、井戸層18aの左端18cから中心部18dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少している。そして、井戸層18aの中心部18dで、バンドギャップが極小となるとともに、中心部18dから右端18eに向かって、再び、一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。なお、井戸層18aの左端18cから中心部18dの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値は、中心部18dから右端18eの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値よりも大きい。これにより、井戸層18aのエネルギーバンドは、三角形状を有するとともに、左右非対称な構造となっている。また、障壁層18bのバンドギャップは、左端18fから中心部18gに向かって、平坦なバンド構造となっており、中心部18gから右端18hに向かって、一定の変化率で減少するバンド構造となっている。

【0143】図41に示したMQW活性層18のエネルギーバンドに、ピエゾ効果による伝導帯のバンドの傾きを考慮した場合には、図42に示すようなバンド図になる。図42を参照して、井戸層18aの伝導帯のエネルギーバンドは、第7実施形態の変形例と同様、井戸層18aの中心部18dで極小となるとともに、価電子帯のエネルギーバンドは、井戸層18aの中心部18dで極大となる。これにより、伝導帯の正孔および価電子帯の電子が、井戸層18aの中心部18d付近に集中する。また、障壁層18bの伝導帯のエネルギーバンドは、図42に示すように、障壁層18bの右側半分（中心部18gから右端18hの範囲）で傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。

【0144】第9実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、伝導帯の電子を井戸層18aの中心部18d付近に集中させるとともに、価電子帯の正孔も中心部18d付近に集中させることによって、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができるので、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。

【0145】また、第9実施形態変形例の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層18aの伝導帯の構造を、井戸層18aの中心に対して非対称な三角形状とすることによって、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合、井戸層18aの伝導帯におけるバンドの傾きを左右均一にすることができる。これにより、さらに、電子-正孔再結合確率を向上させることができる。

【0146】また、第9実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、障壁層18bの伝導帯の右側半分がピエゾ効果によって傾くことを抑制することによって、井戸層18の実質的な深さが浅くなるのを防止することができるので、電子を井戸層18aに閉じ込めやすくすることができる。これにより、発光効率をさらに向上させることができる。

【0147】なお、第9実施形態の変形例のその他の効果は、第1実施形態の変形例と同様である。

【0148】（第10実施形態）図43は、本発明の第10実施形態による窒化物系半導体発光素子MQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。また、図44は、図43に示した第10実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第10実施形態では、MQW活性層において、ピエゾ効果による井戸層の伝導帯の電子の偏りを低減するだけでなく、ピエゾ効果による障壁層の傾きをも抑制した場合の例について説明する。

【0149】この第10実施形態の窒化物系半導体レーザ素子は、図43に示すように、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層19aと、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層19bとを交互に積層することにより形成されたMQW活性層19を有する。

【0150】ここで、第10実施形態では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる井戸層19aのIn組成を、ピエゾ効果による伝導帯の電子の偏りを低減するように変化するとともに、 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる障壁層19bのIn組成を、ピエゾ効果による障壁層19bの価電子帯および伝導帯の傾きを抑制するように変化している。

【0151】なお、井戸層19aのバンド構造は、図30に示した第7実施形態の井戸層13aのバンド構造と同様の構造を有する。すなわち、井戸層19aのバンド

ギャップは、図43に示すように、左端19cから中心部19dの範囲で、一定の変化率で減少する。そして、井戸層19aの中心部19dで、バンドギャップが極小となるとともに、中心部19dから右端19eの範囲で、バンドギャップが一定の変化率で増加する構造となっている。また、井戸層19aの左端19cから中心部19dの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値は、中心部19dから右端19eの範囲におけるバンドギャップの変化率の絶対値よりも大きい。これにより、井戸層19aのエネルギーバンドは、三角形状を有する左右非対称な構造となっている。また、障壁層19bのバンドギャップは、左端19fから右端19gに向かって、一定の変化率で減少し、中心部19gでバンドギャップが極小となるとともに、中心部19gから右端19hに向かって、再び、左端19fから右端19gの範囲と同一の変化率で増加する障壁層19bの中心に対して対称なバンド構造となっている。

【0152】図43に示した構造を有するMQW活性層19のエネルギーバンドに、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合には、図44に示すようなバンド図になる。図44を参照して、井戸層19aの価電子帯のエネルギーバンドは、第7実施形態と同様、井戸層19aの中心部19dで極大となるとともに、伝導帯のエネルギーバンドは、井戸層19aの中心部19d付近で極小となる。これにより、伝導帯の正孔および価電子帯の電子が、井戸層19aの中心部19d付近に集中する。また、障壁層19bの価電子帯の右側半分（中心部19gから右端19hの範囲）および伝導帯の左側半分（左端19fから中心部19gの範囲）で傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。

【0153】第10実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔を井戸層19aの中心部19d付近に集中させるとともに、伝導帯の電子を中心部19d付近に集中させることによって、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができるので、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。

【0154】また、第10実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、障壁層19bの価電子帯の右側半分および伝導帯の左側半分の領域のバンド構造がピエゾ効果によって傾くことを抑制することによって、井戸層19の実質的な深さが浅くなるのを防止することができるので、電子および正孔を井戸層19aに閉じ込めやすくすることができる。これにより、発光効率をさらに向上させることができる。

【0155】また、第10実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層19aの伝導帯の構造を、井戸層19aの中心に対して非対称な三角形

状とすることによって、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合、井戸層19aの伝導帯におけるバンドの傾きを左右均一にすることができる。これにより、さらに、電子-正孔再結合確率を向上させることができる。

【0156】なお、第10実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0157】（第11実施形態）図45は、本発明の第11実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）の構造を示した断面図である。図46は、図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層を示した断面図である。図47は、図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図48は、図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第11実施形態では、絶縁性のサファイア基板を用いた窒化物系半導体レーザ素子において、ピエゾ効果による井戸層の価電子帯の正孔の偏りを低減するだけでなく、ピエゾ効果による障壁層の価電子帯の傾きをも抑制した場合の例について説明する。

【0158】まず、図45を参照して、第11実施形態の窒化物系半導体レーザ素子の構造について説明する。この第11実施形態では、図45に示すように、サファイア基板21上に、所定の間隔を隔ててSiNからなるマスク層22が形成されている。マスク層22によって開口されたサファイア基板21の上面上に、Ga<sub>0.5</sub>N低温バッファ層23が形成されている。このマスク層22およびGa<sub>0.5</sub>N低温バッファ層23上に、ELOG法により成長されたELOG低欠陥Ga<sub>0.5</sub>N層24が形成されている。

【0159】ELOG低欠陥Ga<sub>0.5</sub>N層24上には、n型Ga<sub>0.5</sub>Nコンタクト層25、約0.1μmの厚みを有するIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nからなるn側光吸収モード安定化層26、約1.0μmの厚みを有するn型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層27、約0.1μmの厚みを有するn型Ga<sub>0.5</sub>N光ガイド層28、アンドープInGa<sub>0.5</sub>NからなるMQW活性層29、p型AlGa<sub>0.5</sub>Nキャップ層30、約0.1μmの厚みを有するp型Ga<sub>0.5</sub>N光ガイド層31、および、約0.3μmの厚みを有するとともに、凸部を含むp型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層32がこの順序で形成されている。このp型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層32の凸部上には、約0.07μmの厚みを有するp型Ga<sub>0.5</sub>Nコンタクト層33が形成されている。p型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層32と、p型Ga<sub>0.5</sub>Nコンタクト層33とによって、ストライプ状（細長状）のリッジ部が形成されている。

【0160】また、p型Ga<sub>0.5</sub>Nコンタクト層33の上面以外の領域を覆うとともに、p型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層

32の上面の全面を覆うように、Ga<sub>0.95</sub>Nからなるp側光吸収モード安定化層34が約0.2 μmの厚みで形成されている。p型Ga<sub>0.95</sub>Nコンタクト層33上には、p側電極35が形成されている。このp側電極35の上面以外、および、n型Ga<sub>0.95</sub>Nコンタクト層25の露出された上面の一部以外の全面を覆うように、SiO<sub>2</sub>からなる絶縁膜36が形成されている。

【0161】そして、p側電極35の上面の全面を覆うように、p側パッド電極37が形成されている。また、n型Ga<sub>0.95</sub>Nコンタクト層25の開口部により露出された上面に接触するように、n側電極38が形成されている。

【0162】次に、図46～図48を参照して、上記した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層29の構造について説明する。この第11実施形態のMQW活性層29は、図46に示すように、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層29aと、In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>Nからなる障壁層29bとを交互に積層した構造を有している。

【0163】ここで、第11実施形態では、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層29aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減するように変化させるとともに、In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>Nからなる障壁層29bのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の傾きを抑制するように変化させている。なお、井戸層29aのバンド構造は、図14に示した第3実施形態と同様のバンド構造である。また、障壁層29bのバンド構造は、図40に示した第9実施形態と同様である。すなわち、井戸層29aのバンドギャップは、図47に示すように、井戸層29aの左端29cから中心部29dに向かって、一定の変化率で傾斜状に増加している。そして、井戸層29aの中心部29dで、段差状に増加するとともに、中心部29dから右端29eに向かって、再び、バンドギャップが一定の変化率で傾斜状に増加する構造となっている。このため、井戸層29aのバンドギャップは、井戸層29aの中心に対して非対称なバンド構造となっている。

【0164】また、障壁層29bのバンドギャップは、左端29fから中心部29gの範囲で、バンドギャップを一定の変化率で増加するとともに、中心部29gから右端29hの範囲で、平坦なバンドギャップを有するバンド構造となっている。

【0165】このような構造を有するMQW活性層29のエネルギーバンドに、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合、図48に示すようなバンド図になる。図48を参照して、井戸層29aの価電子帯のエネルギーバンドは、第3実施形態と同様、左端29cから中心部29dに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。そして、井戸層29aの中心部29dで、段差状に減少するとともに、中心部29dから右端29eの範

囲に向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。これにより、井戸層29aの価電子帯の正孔は、より高いエネルギーを有する井戸層29aの左側半分（左端29cから中心部29dの範囲）の領域に集中する。また、障壁層29bの価電子帯のエネルギーバンドは、障壁層29bの左端29fから中心部29gに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となるとともに、中心部29gから右端29hに向かって、一定の変化率で増加するバンド構造となっている。

【0166】第11実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔が、井戸層29の左側半分に集中するとともに、伝導帯の電子もより低いエネルギーを有する井戸層3aの左端29c付近に集中するので、井戸層29aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0167】また、第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、障壁層29bの価電子帯の左半分の領域がピエゾ効果によって傾くことを抑制することによって、井戸層29aの実質的な深さが浅くなるのを防止することができるので、電子を井戸層29aに閉じ込めやすくすることができる。これにより、発光効率をさらに向上させることができる。

【0168】なお、第11実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0169】図49～図51は、図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。図45および45～47を参照して、第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスについて説明する。

【0170】まず、図49に示すように、サファイア基板21上に、所定の間隔を隔ててSiNからなるマスク層22を形成する。次に、マスク層22の開口部により露出されたサファイア基板21上に、Ga<sub>0.95</sub>N低温バッファ層23を形成する。そして、マスク層22をマスクとして、マスク層22およびGa<sub>0.95</sub>N低温バッファ層23上に、ELOG低欠陥Ga<sub>0.95</sub>N層24を選択横方向成長法により形成する。次に、ELOG低欠陥Ga<sub>0.95</sub>N層24上に、約1000℃の基板温度条件下で、NH<sub>3</sub>、TMGおよびSiH<sub>4</sub>を用いてn型Ga<sub>0.95</sub>Nコンタクト層25、SiH<sub>4</sub>、DEZ、NH<sub>3</sub>、TEGおよびTMIを用いて約0.1 μmの厚みを有するIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nからなるn側光吸収モード安定化層26、NH<sub>3</sub>、TMG、TMAおよびSiH<sub>4</sub>を用いて約1.0 μmの厚みを有するn型AlGa<sub>0.95</sub>Nクラッド層27、および、NH<sub>3</sub>、TMGおよびSiH<sub>4</sub>を用いて約0.1 μmの厚みを有す

るn型Ga<sub>0.9</sub>N光ガイド層28を順次形成する。

【0171】そして、基板温度を約800℃に降温した後、NH<sub>3</sub>、TEGおよびTMIを用いてアンドープInGa<sub>0.9</sub>Nからなる約3.5nmの厚みを有する井戸層29a（図46参照）と、約20nm厚みを有する障壁層29bとからなるMQW活性層29を形成する。このMQW活性層29上に、NH<sub>3</sub>、TMA、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いてp型AlGa<sub>0.9</sub>Nキャップ層30を形成した後、基板温度を約1000℃に、再び、昇温する。その後、p型AlGa<sub>0.9</sub>Nキャップ層30上に、NH<sub>3</sub>、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いて約0.1μmの厚みを有するp型Ga<sub>0.9</sub>N光ガイド層31、NH<sub>3</sub>、TMA、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いて約0.3μmの厚みを有するp型AlGa<sub>0.9</sub>Nクラッド層32、および、NH<sub>3</sub>、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いて約0.07μmの厚みを有するp型Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層33を形成する。

【0172】次に、図50に示すように、フォトリソグラフィ技術およびエッチング技術を用いて、p型Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層33およびp型AlGa<sub>0.9</sub>Nクラッド層32の一部を除去することによって、ストライプ状のリッジ部を形成する。そして、p型Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層33の上面に、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>からなるマスク層38を形成する。

【0173】その後、図51に示すように、約1000℃の基板温度条件下で、マスク層38をマスクとして、マスク層38を除く全面に、NH<sub>3</sub>、TMG、SiH<sub>4</sub>およびDEZを用いてGa<sub>0.9</sub>Nからなるp側光吸収モード安定化層34を約0.2μmの厚みで選択成長する。この後、マスク層38は除去する。

【0174】最後に、図45に示したように、p型Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層33の上面を除く全面を覆うとともに、n型Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層25の露出された上面上に開口部を有するSiO<sub>2</sub>からなる絶縁膜36を形成する。そして、p型Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層33の上面に、p側電極35およびp型パッド電極37を形成する。そして、絶縁膜36の開口部によって露出されたn型Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層25と接触するように、n側電極38を形成することによって、第11実施形態の窒化物系半導体レーザ素子が完成される。

【0175】（第12実施形態）図52は、本発明の第12実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）の構造を示した断面図である。図53は、図52に示した第12実施形態の窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層を示した断面図である。図54は、図52に示した第12実施形態の窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図55は、図52に示した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第12実施形態では、導電性のZrB<sub>2</sub>基板を用いた窒化物系半導体レーザ素子におい

て、ピエゾ効果による井戸層の価電子帯の正孔の偏りを低減するだけでなく、ピエゾ効果による障壁層の価電子帯の傾きをも抑制した場合の例について説明する。

【0176】まず、図52を参照して、第12実施形態の窒化物系半導体レーザ素子の構造について説明する。この第12実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、図52に示すように、導電性を有するZrB<sub>2</sub>基板41上に、n型Ga<sub>0.9</sub>N高温バッファ層42、約1.0μmの厚みを有するn型AlGa<sub>0.9</sub>Nクラッド層43、約0.1μmの厚みを有するn型Ga<sub>0.9</sub>N光ガイド層44、アンドープInGa<sub>0.9</sub>NからなるMQW活性層45、p型AlGa<sub>0.9</sub>Nキャップ層46、約0.1μmの厚みを有するp型Ga<sub>0.9</sub>N光ガイド層47、および、約0.3μmの厚みを有するとともに、凸部を含むp型AlGa<sub>0.9</sub>Nクラッド層48がこの順序で形成されている。

【0177】また、p型AlGa<sub>0.9</sub>Nクラッド層48の凸部の上面を除く全面を覆うように、Ga<sub>0.9</sub>Nからなるp側光吸収モード安定化層49が約0.2μmの厚みで形成されている。そして、p側光吸収モード安定化層49の上面、および、p型AlGa<sub>0.9</sub>Nクラッド層48の露出された上面に接触するように、p側Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層50が形成されている。このp側Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層50上に、p側電極51が形成されている。また、ZrB<sub>2</sub>基板41の裏面に、n側電極52が形成されている。

【0178】次に、図53～図55を参照して、上記した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層45の構造について説明する。この第12実施形態のMQW活性層45は、図53に示すように、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層45aと、In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>Nからなる障壁層45bとを交互に積層した構造を有している。

【0179】ここで、第12実施形態では、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層45aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減するとともに、In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>Nからなる障壁層45bのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の傾きを抑制するように変化させている。なお、井戸層45aのバンド構造は、図26に示した第6実施形態と同様である。また、障壁層45bのバンド構造は、図35に示した第8実施形態と同様である。すなわち、井戸層45aのバンドギャップは、図54に示したように、障壁層45bの右端45cと同一のバンドギャップを有する井戸層45aの左端45cから中心部45dに向かって、一定の変化率で傾斜的に減少する。そして、井戸層45aの中心部45dで、バンドギャップが極小となるとともに、中心部45dから右端45eに向かって、再び、バンドギャップを一定の変化率で増加している。このため、井戸層45aのバンドギャップは、井戸層45aの中心に対して非対称なバンド構造となっている。

【0180】また、障壁層45bのバンドギャップは、

左端45fから右端45cの範囲で、バンドギャップを一定の変化率で傾斜状に増加させたバンド構造となっている。

【0181】このような構造を有するMQW活性層50のエネルギーバンドに、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合には、図55に示すようなバンド図になる。図55を参照して、井戸層45aの価電子帯のエネルギーバンドは、左端45cから中心部45dに向かって、急激に増加する。そして、井戸層45aの中心部45dで、段差状に増加するとともに、中心部45dから右端45eに向かって、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。これにより、価電子帯の正孔は、より高いエネルギーを有する井戸層45aの右側半分（中心部45dから右端45eの範囲）に集中する。また、障壁層45bの価電子帯のエネルギーバンドは、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。

【0182】第12実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔が、井戸層45aの右側半分に集中するとともに、伝導帯の電子もより低いエネルギーを有する井戸層45aの中心部45d付近に集中するので、井戸層29aにおける実質的なキャリア密度を向上させることができるとともに、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とのずれを小さくすることができる。これにより、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することができるので、発光効率を向上させることができる。

【0183】また、第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、障壁層45bの価電子帯がピエゾ効果によって傾くことを抑制することによって、井戸層45aの実質的な深さが浅くなるのを防止することができるので、電子を井戸層45aに閉じ込めやすくすることができる。これにより、発光効率をさらに向上させることができる。

【0184】なお、第12実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0185】図56～図58は、図52に示した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。図52および52～54を参照して、第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスについて説明する。

【0186】まず、図56に示すように、導電性を有するZrB<sub>2</sub>基板41の表面を、約1000℃の基板温度条件下で、NH<sub>3</sub>を供給することにより窒化する。そして、ZrB<sub>2</sub>基板41上に、TMGおよびSiH<sub>4</sub>を用いてn型Ga<sub>0.5</sub>N高温バッファ層42、NH<sub>3</sub>、TMG、TMAおよびSiH<sub>4</sub>を用いて約1.0μmの厚みを有するn型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層43、および、NH<sub>3</sub>、TMGおよびSiH<sub>4</sub>を用いてn型Ga<sub>0.5</sub>N光ガイド層44を約0.1μmの厚みで順次形成する。そして、基板温

度を約800℃に降温した後、NH<sub>3</sub>、TEGおよびTMIを用いてアンドープInGa<sub>0.5</sub>Nからなる約3.5nmの厚みを有する井戸層45a（図53参照）と、約20nmの厚みを有する障壁層45bとからなるMQW活性層45を形成する。このMQW活性層45上に、NH<sub>3</sub>、TMA、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いてp型AlGa<sub>0.5</sub>Nキャップ層46を形成した後、基板温度を約1000℃に、再び、昇温する。そして、p型AlGa<sub>0.5</sub>Nキャップ層46上に、NH<sub>3</sub>、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いて約0.1μmの厚みを有するp型Ga<sub>0.5</sub>N光ガイド層47、および、NH<sub>3</sub>、TMA、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いてp型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層48を約0.3μmの厚みで形成する。

【0187】次に、図57に示すように、フォトリソングラフィ技術およびエッチング技術を用いて、p型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層48の一部を除去する。これにより、リッジ部を形成する。そして、p型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層48の凸部上に、SiNからなるマスク層53を形成する。

【0188】そして、図58に示すように、約1000℃の基板温度の条件下で、マスク層53をマスクとして、マスク層53を除く全面に、NH<sub>3</sub>、TMG、SiH<sub>4</sub>およびDEZを用いてGa<sub>0.5</sub>Nからなるp側光吸収モード安定化層49を約0.2μmの厚みで選択成長する。この後、マスク層53を除去する。

【0189】最後に、図52に示したように、p型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層48の露出された上面およびp側光吸収モード安定化層49の上面の全面に、NH<sub>3</sub>、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いてp型Ga<sub>0.5</sub>Nコンタクト50層を約0.07μmの厚みで形成する。そして、p型Ga<sub>0.5</sub>Nコンタクト層50の上面の全面に、p側電極51を形成するとともに、ZrB<sub>2</sub>基板41の裏面に、n側電極52を形成する。このようにして、第12実施形態の窒化物系半導体レーザ素子が完成される。

【0190】（第13実施形態）図59は、本発明の第13実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）の構造を示した断面図である。図60は、図59に示した第13実施形態の窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層を示した断面図である。図61は、図59に示した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。図62は、図59に示した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層のピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。この第13実施形態では、導電性のGa<sub>0.5</sub>N基板を用いた窒化物系半導体レーザ素子において、ピエゾ効果による井戸層の価電子帯の正孔の偏りを低減するだけでなく、ピエゾ効果による障壁層の価電子帯および伝導帯の傾きをも抑制した場合の例について説明する。

【0191】まず、図59を参照して、第13実施形態

の窒化物系半導体レーザ素子の構造について説明する。この第13実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、図59に示すように、導電性を有するGa<sub>0.95</sub>N基板81上に、n型Ga<sub>0.95</sub>N高温バッファ層82、約0.1μmの厚みを有するIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nからなるn側光吸収モード安定化層83、約1.0μmの厚みを有するn型AlGa<sub>0.95</sub>Nクラッド層84、約0.1μmの厚みを有するn型Ga<sub>0.95</sub>N光ガイド層85、アンドープInGa<sub>0.95</sub>NからなるMQW活性層86、p型AlGa<sub>0.95</sub>Nキャップ層87、約0.1μmの厚みを有するp型Ga<sub>0.95</sub>N光ガイド層88、および、約0.3μmの厚みを有するとともに、凸部を含むp型AlGa<sub>0.95</sub>Nクラッド層89がこの順序で形成されている。

【0192】また、p型AlGa<sub>0.95</sub>Nクラッド層89の凸部の上面を除く全面を覆うように、アンドープAlGa<sub>0.95</sub>Nからなる電流ブロック層90が約0.2μmの厚みで形成されている。この電流ブロック層90の上面の全面上に、約0.05μmの厚みを有するIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nからなるp側光吸収モード安定化層91が形成されている。そして、このp側光吸収モード安定化層91の上面の全面、および、p型AlGa<sub>0.95</sub>Nクラッド層89の露出された上面と接触するように、p型Ga<sub>0.95</sub>Nコンタクト層92が約0.07μmの厚みで形成されている。このp型Ga<sub>0.95</sub>Nコンタクト層92上に、p側電極93が形成されている。そして、Ga<sub>0.95</sub>N基板81の裏面に、n側電極94が形成されている。

【0193】次に、図60～図62を参照して、上記した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層86の構造について説明する。この第13実施形態のMQW活性層86は、図60に示すように、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層86aと、In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>Nからなる障壁層86bとを交互に積層した構造を有している。

【0194】ここで、第13実施形態では、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層86aのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯の正孔の偏りを低減するように変化させるとともに、In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>Nからなる障壁層86bのIn組成を、ピエゾ効果による価電子帯および伝導帯の傾きを抑制するように変化させている。なお、井戸層86aのバンド構造は、図30に示した第7実施形態と同様のバンド構造である。また、障壁層86bのバンド構造は、図43に示した第10実施形態と同様である。すなわち、井戸層86aのバンドギャップは、図61に示すように、井戸層86aの左端86cから中心部86dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、井戸層86aの中心部86dで、バンドギャップが極小となるとともに、中心部86dから右端86eに向かって、再び、バンドギャップを一定の変化率で傾斜状に増加する。なお、井戸層86aの左側の領域のバンドギャップの変化率の絶対値は、右側の領域のバンドギャップ

の変化率の絶対値よりも小さい。これにより、井戸層13aのバンドギャップは、井戸層86aの中心に対して非対称に形成されている。

【0195】また、障壁層86bのバンドギャップは、左端86fから中心部86gに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少している。そして、中心部86gで、バンドギャップが極小となるとともに、中心部86gから右端86eに向かって、再び、一定の変化率で増加する。なお、障壁層86bの左側の領域のバンドギャップの変化率の絶対値は、右側の領域のバンドギャップの変化率の絶対値と同じである。これにより、障壁層13bのバンドギャップは、障壁層86bの中心に対して対称に形成されている。

【0196】このような構造を有するMQW活性層86のエネルギーバンドに、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合には、図62に示すようなバンド図になる。図62を参照して、井戸層86aの価電子帯のエネルギーバンドは、井戸層86aの左端86cから中心部86dに向かって、一定の変化率で増加する。そして、井戸層86aの中心部86dで、エネルギーバンドが極大となるとともに、中心部86dから右端86eに向かって、再び、一定の変化率で減少する。これにより、価電子帯の正孔は、もっとも高いエネルギーを有する井戸層86aの中心部86dに集中する。また、井戸層86aの伝導帯のエネルギーは、中心部86d付近でもっとも低くなっている。これにより、伝導帯の電子は、井戸層86aの中心部86d付近に集中する。また、障壁層86bの価電子帯のエネルギーバンドは、障壁層86bの中心部86gから右端86hの範囲で、傾きが抑制された平坦な構造となるとともに、伝導帯のエネルギーバンドは、左端86fから中心部86gの範囲で、傾きが抑制された平坦なバンド構造となる。

【0197】第13実施形態の窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、価電子帯の正孔を井戸層86aの中心部86d付近に集中させるとともに、伝導帯の電子を中心部86d付近に集中させることによって、ピエゾ電界が加わった場合の電子の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができるので、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができる。その結果、発光効率をより向上させることができる。

【0198】また、第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子では、上記したように、井戸層86aの価電子帯の構造を、井戸層86aの中心に対して非対称な三角形とすることによって、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合に、井戸層86aの価電子帯におけるバンドの傾きを左右均一にすることができる。これにより、電子-正孔の再結合確率をさらに向上させることができる。

【0199】また、第13実施形態による窒化物系半導



体レーザ素子では、上記したように、障壁層86bの価電子帯の右側半分および伝導帯の左側半分の領域がピエゾ効果によって傾くことを抑制することによって、井戸層86aの実質的な深さが浅くなるのを防止することができるので、電子を井戸層86aに閉じ込めやすくすることができる。これにより、発光効率をさらに向上させることができる。

【0200】なお、第13実施形態のその他の効果は、第1実施形態と同様である。

【0201】図63～図65は、第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。図59および59～61を参照して、第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスについて説明する。

【0202】まず、図63に示すように、導電性を有するGaN基板81上に、約1000℃の温度条件下で、NH<sub>3</sub>、TMGおよびSiH<sub>4</sub>を用いてn型GaN高温バッファ層82、SiH<sub>4</sub>およびDEZを用いて約0.1μmの厚みを有するIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nからなるn側光吸収モード安定化層83、NH<sub>3</sub>、TMG、TMAおよびSiH<sub>4</sub>を用いてn型AlGaNクラッド層84、および、NH<sub>3</sub>、TMGおよびSiH<sub>4</sub>を用いてn型GaN光ガイド層85を約0.1μmの厚みで順次形成する。そして、基板温度を約800℃に降温した後、アンドープInGaNからなる約3.5nmの厚みを有する井戸層86a（図60参照）と、約20nmの厚みを有する障壁層86bとからなるMQW活性層86を形成する。このMQW活性層86上に、NH<sub>3</sub>、TMA、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いてp型AlGaNキャップ層87を形成した後、基板温度を約1000℃に、再び、昇温する。そして、p型AlGaNキャップ層87上に、NH<sub>3</sub>、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いて約0.1μmの厚みを有するp型GaN光ガイド層88、および、NH<sub>3</sub>、TMA、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いてp型AlGaNクラッド層89を約0.3μmの厚みで形成する。

【0203】次に、図64に示すように、フォトリソグラフィ技術およびエッチング技術を用いて、p型AlGaNクラッド層89の一部を除去することによって、ストライプ状のリッジ部を形成する。そして、p型AlGaNクラッド層89の凸部上に、SiNからなるマスク層95を形成する。

【0204】そして、図65に示すように、約1000℃の基板温度条件下で、マスク層95をマスクとして、NH<sub>3</sub>、TMGおよびTMAを用いてAlGaNからなる電流ブロック層90を約2.0μmの厚みで選択成長する。次に、約800℃に降温した後、NH<sub>3</sub>、TMA、TM<sub>1</sub>、SiH<sub>4</sub>およびDEZを用いてIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nからなるp側光吸収モード安定化層91を約0.05μmの厚みで選択成長する。この後、マスク層

95を除去する。

【0205】最後に、図59に示したように、約1000℃の基板温度条件下で、p側In<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N光吸収モード安定化層91の上部の全面、および、p型AlGaNクラッド層89の露出された上面に接触するように、NH<sub>3</sub>、TMGおよびCp<sub>2</sub>Mgを用いてp型GaNコンタクト層92を約0.07μmの厚みで形成する。そして、p型GaNコンタクト層92の上面に、p側電極93を形成するとともに、GaN基板81の裏面に、n側電極94を形成する。このようにして、第13実施形態の窒化物系半導体レーザ素子が完成される。

【0206】なお、今回開示された実施形態は、すべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は、上記した実施形態の説明ではなく特許請求の範囲によって示され、さらに特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれる。

【0207】たとえば、上記実施形態では、窒化物系半導体レーザ素子を形成したが、本発明はこれに限らず、量子井戸構造からなる活性層を含む窒化物系半導体発光素子であればよい。たとえば、窒化物系半導体発光ダイオード素子（LED）であってもよい。

【0208】また、上記第1～第7実施形態およびそれらの変形例では、単一量子井戸構造からなるSQW活性層を含む窒化物系半導体発光素子を形成したが、本発明はこれに限らず、第1～第7実施形態およびそれらの変形例の構造を積層することにより形成される多重量子井戸構造からなるMQW活性層を含む窒化物系半導体発光素子であってもよい。

【0209】また、上記第8～第10実施形態およびそれらの変形例において、井戸層のバンド構造は、第1～第7実施形態およびそれらの変形例の井戸層のいずれであってもよい。

【0210】また、上記第2～第6実施形態およびそれらの変形例において、ピエゾ電界によるバンドの傾きとバンドギャップエネルギーの変化がほぼ等しい場合について詳述したが、本発明はこれに限らず、上記第1実施形態において詳述したように、ピエゾ電界によるバンドの傾きより、バンドギャップエネルギーの変化の方が小さくてもよい。また、ピエゾ電界によるバンドの傾きより、バンドギャップエネルギーの変化の方が大きくなってもよい。

【0211】また、上記実施形態では、InGaNからなる単一または多重量子井戸構造を有する活性層を含む窒化物系半導体発光素子を形成したが、本発明はこれに限らず、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下が見られる材料系であればすべてに適用することが可能である。たとえば、GaNからなる障壁層とInGaNからなる井戸層とを有する量子井戸構造を形成してもよく、AlGaNやAlInGaNからなる障壁層とI



nGa<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層とを有する量子井戸構造を形成してもよい。さらに、InAlGa<sub>1-x</sub>N、GaNP、GaAlNP、InGaAlNP、GaInNAsを含む混晶系などピエゾ効果を有する材料から構成されるバルク活性層、単一量子井戸または多重量子井戸を用いてもよい。

【0212】また、上記実施形態では、基板として、サファイア基板、ZrB<sub>2</sub>基板またはGa<sub>1-x</sub>N基板を用いたが、本発明はこれに限らず、スピネル基板などの絶縁性基板を用いてもよい。あるいは、SiC基板、Si基板またはGaAs基板などの導電性を有する半導体基板を用いてもよい。また、MB<sub>2</sub> (M=Al、Ti、Zr、Hf、V、Nb、Ta、Crなどの金属元素) で表されるホウ素化合物基板を用いてもよい。この場合、特に六方晶の(0001)面ホウ素化合物基板を用いるのが好ましい。

【0213】また、上記実施形態では、ウルツ型構造の(0001)面の面方位を有する量子井戸構造からなる発光層を形成したが、本発明はこれに限らず、ヘテロ接合における結晶の歪みにより電位勾配の発生する面方位であれば、発光層の面方位は、(0001)面でもよい。すなわち、発光層の歪み量子井戸構造の面方位が(HKL)面(H+K+L=0、かつ、H=K=L=0を除く任意の数)で表される面方位以外であれば、いかなる面方位であってもよい。

【0214】また、上記実施形態では、ウルツ型構造の材料からなる量子井戸構造を有する発光層を形成したが、本発明はこれに限らず、材料はウルツ型構造に限られるものではない。たとえば、閃亜鉛構造の材料からなる(111)面の量子井戸構造を有する発光層を形成してもよい。また、閃亜鉛構造からなる量子井戸構造を有する発光層を形成する場合において、ヘテロ接合における結晶の歪みにより電位勾配の発生する面方位であれば、発光層の面方位は、(111)面と等価な面方位に限られるものではない。すなわち、歪み量子井戸の面方位が[100]軸を面内に含む面方位およびこれと等価な面方位以外であればいかなる面方位であっても、歪みによる電位勾配が量子井戸構造の閉じ込め方向に発生する。つまり、発光層の面方位が(OMN)面(M、Nは、M=N=0を除く任意の数)で表される面方位以外の面方位、および、これらと等価な面であればいかなる面方位であってもよい。

【0215】また、上記実施形態では、InGa<sub>1-x</sub>Nからなる障壁層とInGa<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層とからなる圧縮歪みを有する量子井戸構造を形成したが、本発明はこれに限らず、量子井戸面内で引張り歪みを有する場合であってもよい。たとえば、Ga<sub>1-x</sub>N基板上に、AlBGa<sub>1-x</sub>N/AlBGa<sub>1-x</sub>Nからなる量子井戸構造を有する活性層を形成してもよい。この場合、量子井戸層、障壁層ともに、引張り歪みとなる。また、Ga<sub>1-x</sub>N基板上に、AlG

a<sub>1-x</sub>Nからなる障壁層と、GaIn<sub>1-x</sub>Nからなる井戸層を有する量子井戸構造を含む活性層を形成してもよい。この場合、量子井戸層は圧縮歪みとなり、障壁層は引張り歪みとなる。また、Ga<sub>1-x</sub>N基板上に、Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.53</sub>In<sub>0.12</sub>Nからなる障壁層と、Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Nからなる井戸層を有する量子井戸構造を含む活性層を形成してもよい。この場合、量子井戸層は引張り歪みとなり、障壁層は圧縮歪みとなる。

【0216】また、上記実施形態では、発光層の量子井戸構造を窒化物系半導体で構成したが、本発明はこれに限らず、他の3-5族半導体や、2-6族半導体により発光層の量子井戸構造が構成される場合にも、本発明は適用できる。たとえば、ウルツ型構造のZnO、および、ZnOにBe、Mg、Cd、HgやS、Se、Teを含む混晶半導体から選ばれる材料から構成される量子井戸構造であってもよい。あるいは、閃亜鉛構造のAlGaInP、AlGaInAs、GaInNAs、GaInAsPなどから構成される量子井戸構造であってもよい。しかしながら、窒化物系半導体ではピエゾ効果が特に大きいので、量子井戸構造が窒化物系半導体からなる場合に、本発明の効果が大きい。

【0217】なお、上記した実施形態およびそれらの変形例では、井戸層および障壁層の少なくとも一方のバンドギャップを、井戸層および障壁層の少なくとも一方の厚み方向の中心に対して非対称になるように形成したが、本発明はこれに限らず、バンドギャップを厚み方向の中心に対して対称となるように形成してもよい。たとえば、図66および図67に示すようなIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Nからなる井戸層を有する量子井戸構造を形成してもよい。図67を参照して、この量子井戸構造の価電子帯のバンドギャップは、井戸層96aの左端96cから中心部96dに向かって、一定の変化率で傾斜状に減少する。そして、中心部96dで、最小値となるとともに、中心部96dから右端96eに向かって、一定の変化率で傾斜状にバンドギャップが増加している。なお、井戸層96aの中心部96dの左右のバンドギャップの変化率は等しい。このため、井戸層96aのバンドギャップは、井戸層96aの中心に対して対称に形成されている。この場合、障壁層96bの左端96f(右端96g)のバンドギャップと、井戸層96aの右端96e(左端96c)のバンドギャップとで、バンドギャップが急峻に不連続に変化しているのが好ましい。

【0218】このようなエネルギーバンドを有する量子井戸構造に、ピエゾ効果による影響を考慮した場合、図68に示すようなバンド図になる。図68を参照して、井戸層96aの中央付近で、価電子帯のエネルギーが最大となるとともに、伝導帯のエネルギーが最小となる。これにより、価電子帯の正孔を井戸層13aの中央付近に集中させるとともに、伝導帯の電子を中央付近に集中させることができるので、ピエゾ電界が加わった場合の電子

の波動関数の振幅が最大となる位置と、正孔の波動関数の振幅が最大となる位置とを一致させることができる。その結果、電子-正孔の再結合確率の低下を著しく抑制することができるので、発光効率をより向上させることができる。

#### 【0219】

【発明の効果】以上のように、本発明によれば、応答速度の低下や閾値電流密度の増加などの問題点を発生させることなく、ピエゾ効果による電子-正孔の再結合確率の低下を抑制することが可能な半導体発光素子を提供することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層を示した断面図である。

【図2】図1に示した第1実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図3】図1に示した第1実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図4】図1に示した第1実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図5】図1に示した第1実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図6】本発明の第1実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図7】図6に示した第1実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図8】図6に示した第1実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図9】図6に示した第1実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図10】本発明の第2実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図11】図10に示した第2実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図12】本発明の第2実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q

W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図13】図12に示した第2実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図14】本発明の第3実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図15】図14に示した第3実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図16】本発明の第3実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図17】図16に示した第3実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図18】本発明の第4実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図19】図18に示した第4実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図20】本発明の第4実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図21】図20に示した第4実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図22】本発明の第5実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図23】図22に示した第5実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図24】本発明の第5実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図25】図24に示した第5実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図26】本発明の第6実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のS Q W活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図27】図26に示した第6実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のS Q W活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図28】本発明の第6実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図29】図28に示した第6実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図30】本発明の第7実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図31】図30に示した第7実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図32】本発明の第7実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図33】図32に示した第7実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図34】本発明の第8実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のMQW活性層を示した断面図である。

【図35】図34に示した第8実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、エネルギーバンドを示したバンド図である。

【図36】図34に示した第8実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層におけるピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図37】本発明の第8実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のMQW活性層を示した断面図である。

【図38】図37に示した第8実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図39】本発明の第9実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のMQW活性層を示した断面図である。

【図40】図39に示した第9実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図41】本発明の第9実施形態の変形例による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のMQW活性層を示した断面図である。

【図42】図41に示した第9実施形態の変形例による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図43】本発明の第10実施形態による窒化物系半導

体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）のMQW活性層を示した断面図である。

【図44】図43に示した第10実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図45】本発明の第11実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）の構造を示した断面図である。

【図46】図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層を示した断面図である。

【図47】図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図48】図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図49】図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図50】図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図51】図45に示した第11実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図52】本発明の第12実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）の構造を示した断面図である。

【図53】図52に示した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層を示した断面図である。

【図54】図52に示した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図55】図52に示した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図56】図52に示した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図57】図52に示した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図58】図52に示した第12実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図59】本発明の第13実施形態による窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）の構造を示した断面図である。

【図60】図59に示した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層を示した断面図である。

【図61】図59に示した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図62】図59に示した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図63】図59に示した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図64】図59に示した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図65】図59に示した第13実施形態による窒化物系半導体レーザ素子の製造プロセスを説明するための断面図である。

【図66】井戸層のバンドギャップを厚み方向の中心に対して対称に変化させた窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層を示した断面図である。

【図67】図66に示した窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図であ

る。

【図68】図66に示した窒化物系半導体レーザ素子のMQW活性層における、ピエゾ効果によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

【図69】従来の量子井戸構造からなる活性層を備える窒化物系半導体発光素子（窒化物系半導体レーザ素子）を示した断面図である。

【図70】図69に示した従来の窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層を示す断面図である。

【図71】図69に示した従来の窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層のエネルギーバンドを示したバンド図である。

【図72】図69に示した従来の窒化物系半導体レーザ素子のSQW活性層における、ピエゾ電界によるバンドの傾きを考慮した場合のバンド図である。

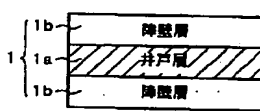
【符号の説明】

1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22 活性層（発光層）

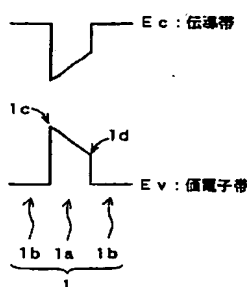
1a、2a、3a、4a、5a、6a、7a、8a、9a、10a、11a、12a、13a、14a、15a、16a、17a、18a、19a、20a、21a、22a 井戸層

1b、2b、3b、4b、5b、6b、7b、8b、9b、10b、11b、12b、13b、14b、15b、16b、17b、18b、19b、20b、21b、22b 障壁層

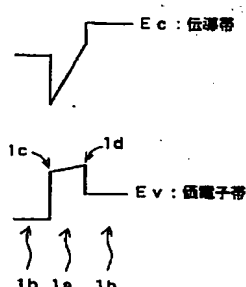
【図1】



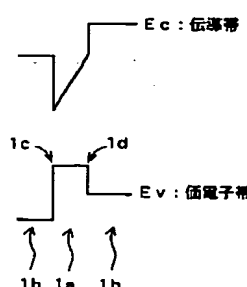
【図2】



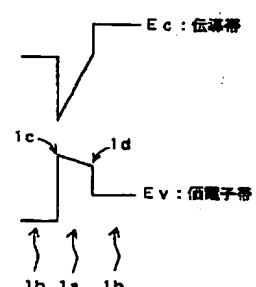
【図3】



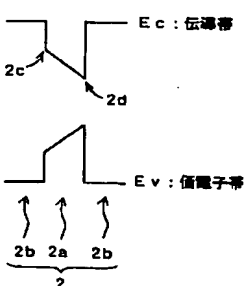
【図4】



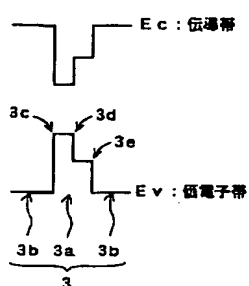
【図5】



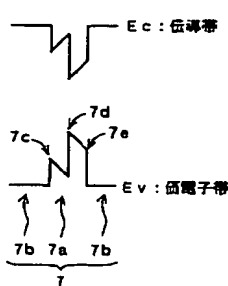
【図6】



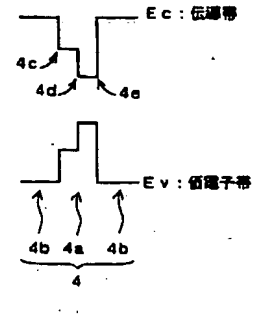
【図10】



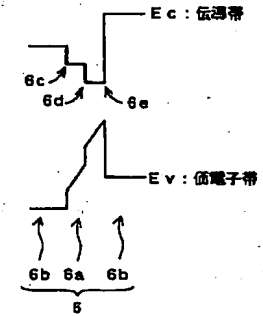
【図18】



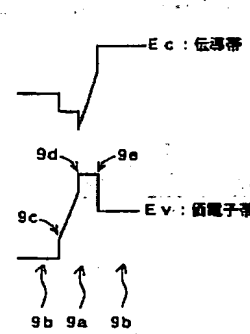
【图 1 2】



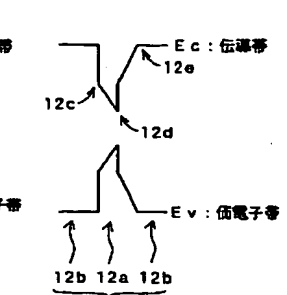
【图 1.7】



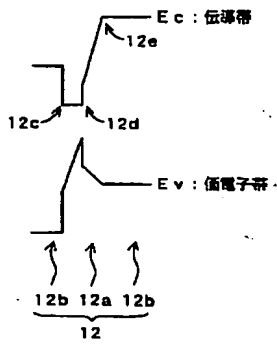
【图 2 3】



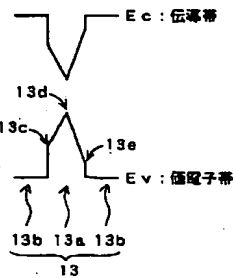
【圖 28】



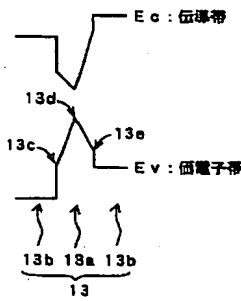
【図29】



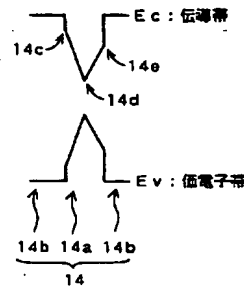
【図30】



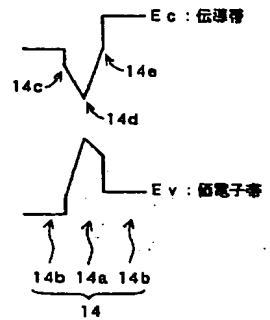
【図31】



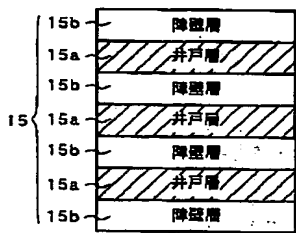
【図32】



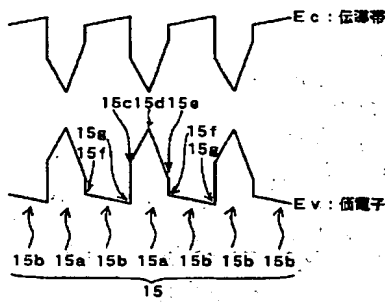
【図33】



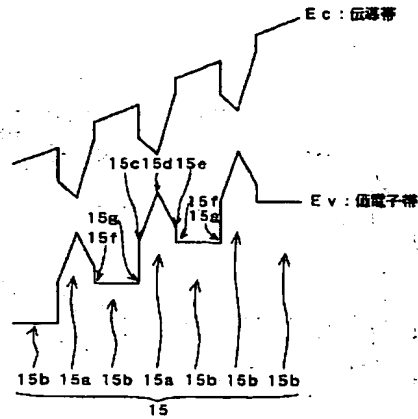
【図34】



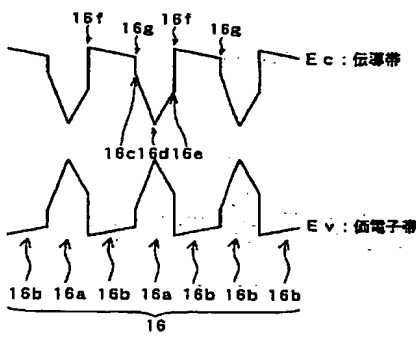
【図35】



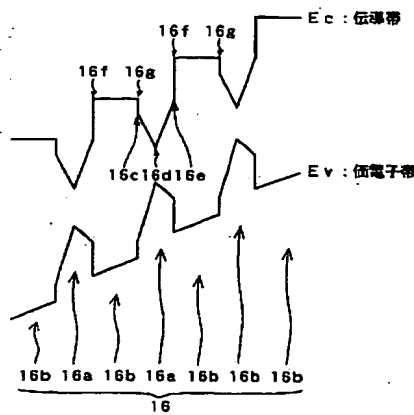
【図36】



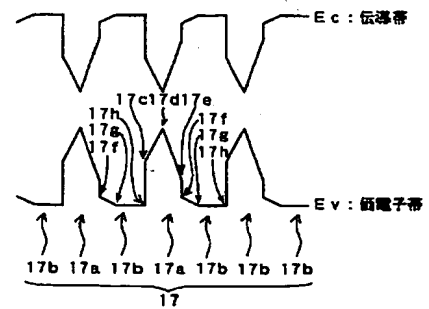
【図37】



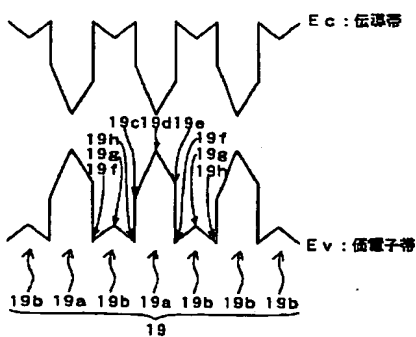
【図38】



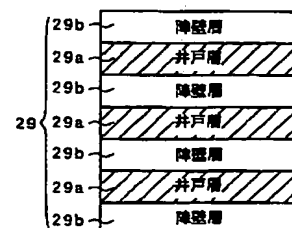
【図39】



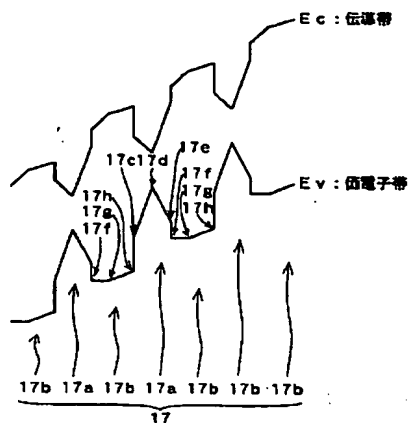
【図43】



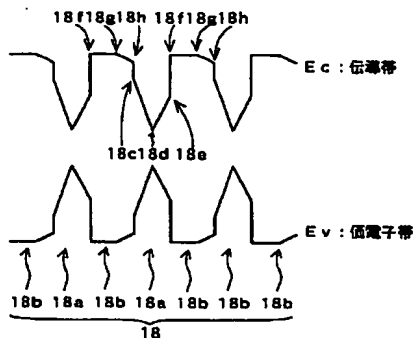
【図46】



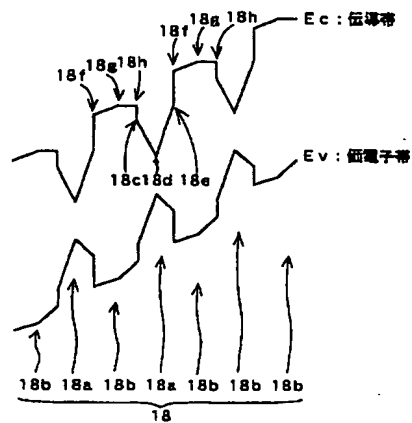
【図 40】



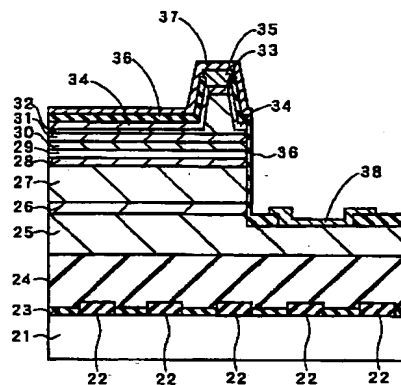
【図 41】



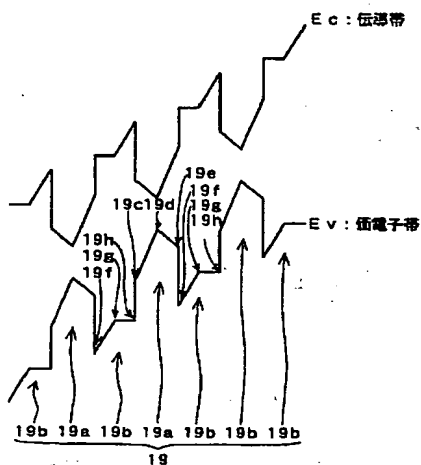
【図 42】



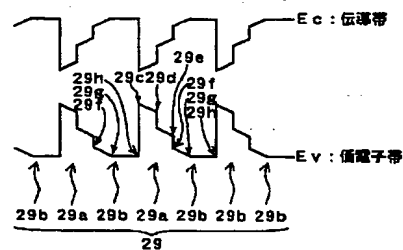
【図 45】



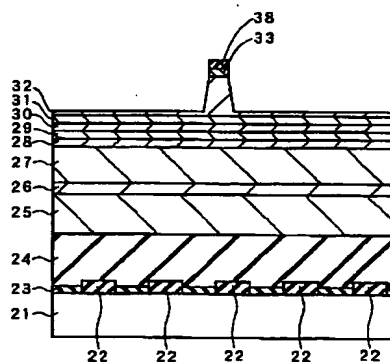
【図 44】



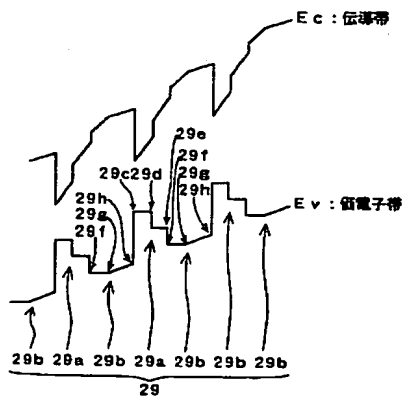
【図 47】



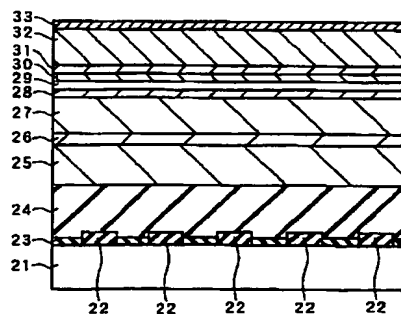
【図 50】



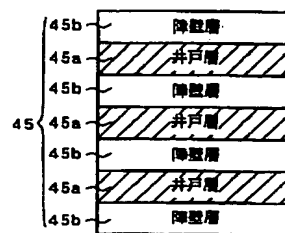
【図 48】



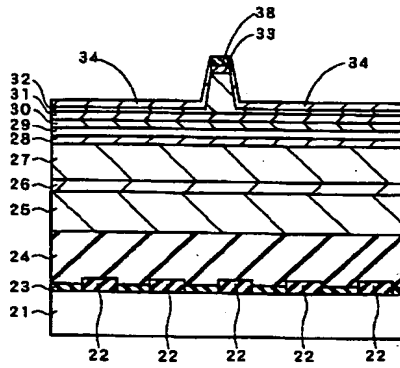
【図 49】



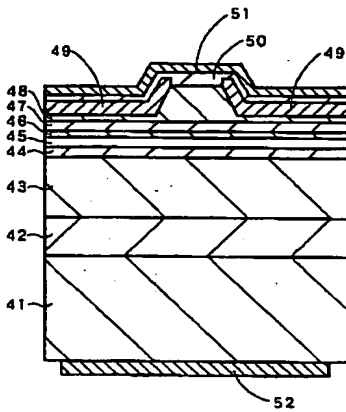
【図 53】



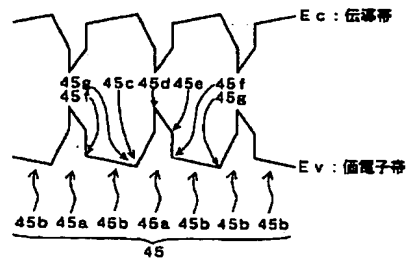
【図 51】



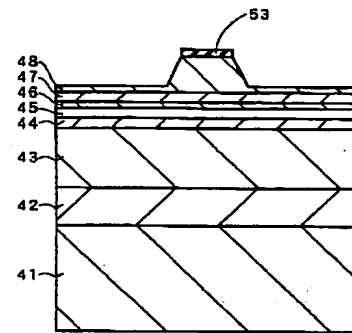
【図 52】



【図 54】

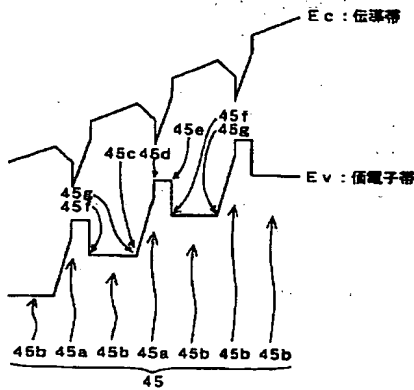


【図 57】

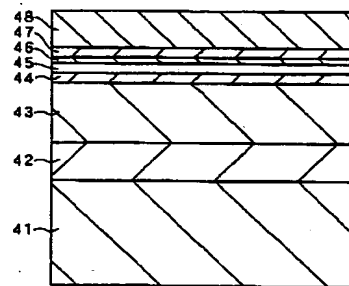


【図 66】

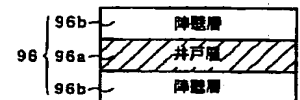
【図 55】



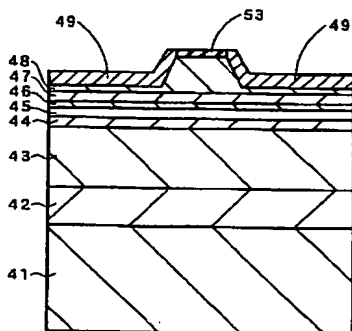
【図 56】



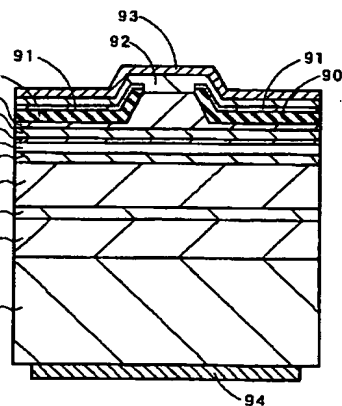
【図 60】



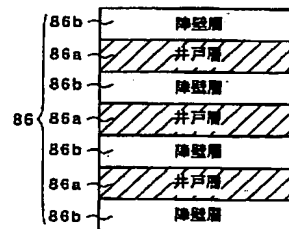
【図 58】



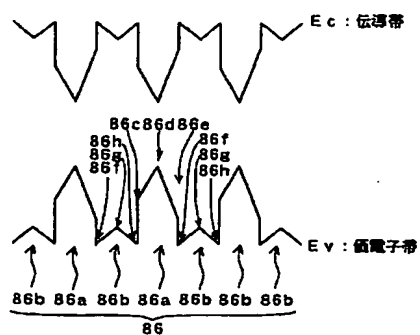
【図 59】



【図 70】

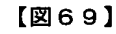


【図 61】





【图 6 4】



【图 6 7】

